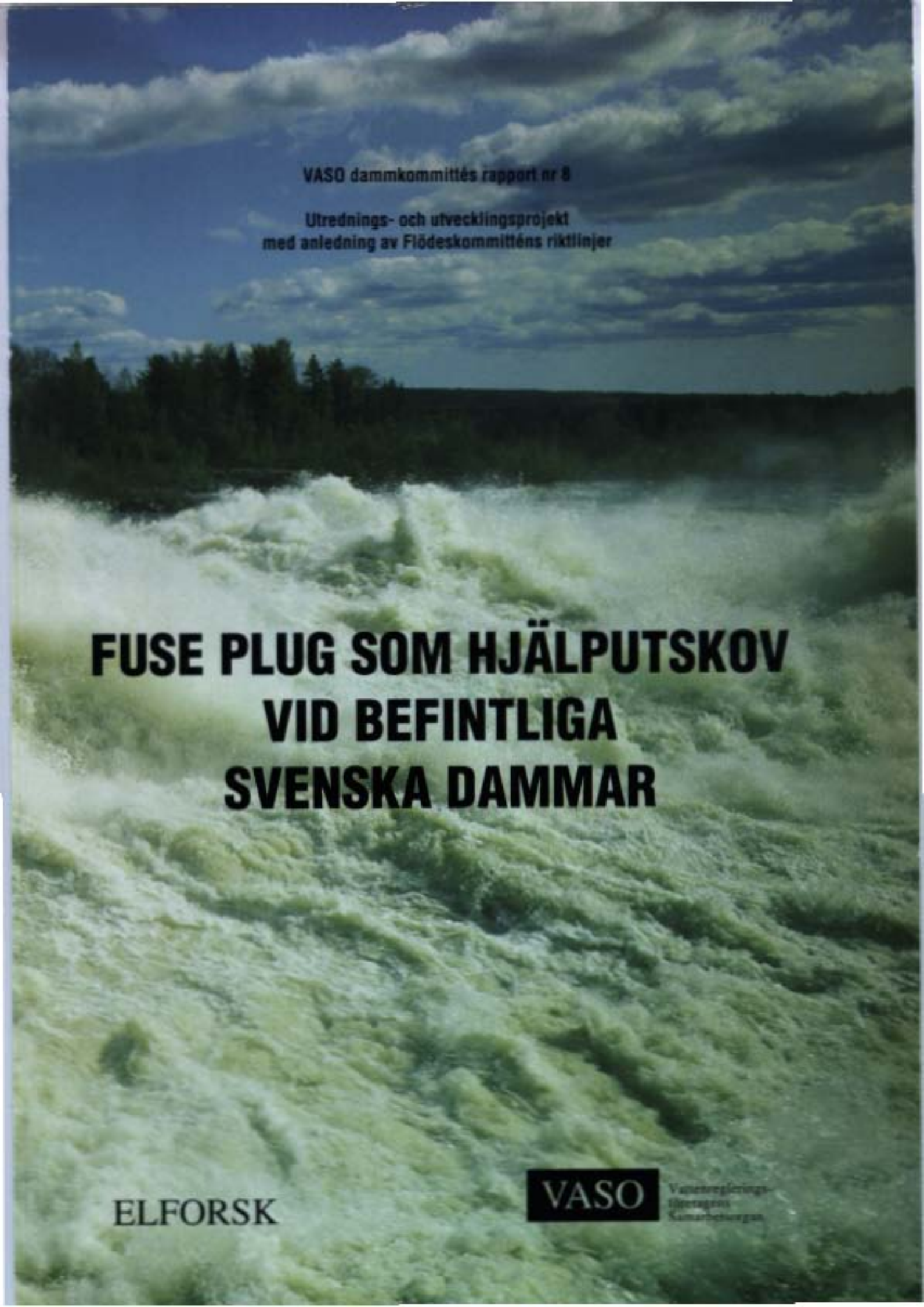




VASO dammkommittés rapport nr 8

Utrednings- och utvecklingsprojekt
med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer

FUSE PLUG SOM HJÄLPUTSKOV VID BEFINTLIGA SVENSKA DAMMAR

ELFORSK

VASO

Vänerreglerings-
företagens
Samarbetsorgan

VASO dammkommittés rapport nr 8

**Utrednings- och utvecklingsprojekt
med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer**

FUSE PLUG SOM HJÄLPUTSKOV VID BEFINTLIGA SVENSKA DAMMAR

Michaela Dan, Kungliga Tekniska Högskolan

Omslagsfoto: Bengt Johansson, Vattenfall
Grafisk form: Fras&Form
Tryck: Spånga Tryckeri AB 1996
ISSN 1400-7827

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	i
SAMMANFATTNING	ii
SUMMARY	iii
1. INLEDNING	1
1.1. Bakgrund	1
1.2. Målsättning	1
1.3. Relaterade projekt	1
1.4. Medverkande	2
2. ALLMÄN ÖVERSIKT	3
2.1. Definition av begreppet fuse plug	3
2.2. Typer av fuseplug	4
2.2.1. Eroderbar dammdel	5
2.2.2. Fuseplug av stål eller betong	5
2.2.2.1 Fuseplug med aktivering genom högt vattenstånd	5
2.2.2.2 Fuseplug med aktivering som kräver teknisk åtgärd	5
2.3. Vattenvägen	6
2.3.1. Utformning	7
2.3.2. Energiomvandling	8
2.3.3. Erosionsskydd	9
2.3.3.1. Erosionsskydd av lösa eller samankopplade element	9
2.3.3.2. Erosionsskydd med stegformade ytor	9
2.3.3.3. Övriga typer av erosionsskydd	10
3. ERODERBARA DAMMDELAR	11
3.1. Funktionsprincip	11
3.2. Specifik avbördning	11
3.3. Utformning	12
3.4. Aktiveringsmetoder	13
3.4.1. Aktiveringsprinciper	13
3.4.1.1. Aktivering genom högt vattenstånd	14
3.4.1.2. Aktivering genom överströmning	14
3.4.1.3. Aktivering genom genomströmning	14
3.4.1.4. Aktivering genom teknisk åtgärd	14
3.4.2. Aktivering utan initieringsanordningar	14
3.4.2.1. Aktivering genom överströmning	14
3.4.2.2. Aktivering genom speciell krönutformning	15
3.4.3. Aktivering med initieringsanordningar	15
3.4.3.1. Aktivering med "pilot channel"	15
3.4.3.2. Aktivering med "piping devices"	16
3.4.3.3. Aktivering med hjälp av nedsänkta kanaler	20
3.4.4. Aktivering genom teknisk åtgärd	20
3.5. Åtgärder för att säkerställa eroderbarhet	21
3.5.1. Faktorer som påverkar erosionsprocessen	21

3.5.2.	Åtgärder	22
3.5.2.1.	Materialval och placering	22
3.5.2.2.	Bevarande av hög genomsläpplighet	22
3.6.	Åtgärder för att förhindra skadlig erosion	22
3.6.1.	Materialets utplacering	22
3.6.2.	Vågskydd	23
3.6.3.	Krafter från is	23
3.6.4.	Tätkärna	24
3.6.4.1.	<i>Tjäle</i>	24
3.6.4.2.	<i>Uttorkning</i>	24
3.6.4.3.	<i>Åtgärder</i>	25
3.6.5.	Erosionsskydd	25
3.6.5.1.	<i>Skiljevägg av betong</i>	25
3.6.5.2.	<i>Förankrat nät</i>	26
3.6.5.3.	<i>Betongtröskel</i>	26
4.	KRITERIER VID VAL AV FUSEPLUG	27
4.1.	Allmänt	27
4.1.1.	Kompletterande utskov och reservutskov	27
4.1.2.	Säkerhetsaspekter	28
4.1.3.	Ekonomiska aspekter	28
4.2.	Förutsättningar för tillämpning av fuseplug	28
4.2.1.	Specifik avbördning och bredd	28
4.2.2.	Läge, topografi och geologi	29
4.2.3.	Dammens uppbyggnad och kondition	29
4.2.3.1.	<i>Möjlighet till överdämning</i>	29
4.2.4.	Skador och konsekvenser vid aktivering	30
4.3.	Kompletterande utskov	31
4.3.1.	Allmänt	31
4.3.2.	Befintlig avbördningskapacitet	31
4.3.3.	Erfordrad avbördningskapacitet	31
4.3.4.	Eroderbar dammdel som kompletterande utskov	31
4.4.	Reservutskov	32
4.4.1.	Allmänt	32
4.4.2.	Hypotetiska fall för reservutskov	32
4.5.	Val av typ av utskov	33
4.5.1.	Allmänt	33
4.5.1.1.	<i>Återkomsttider för funktion</i>	33
4.5.1.2.	<i>Aktiveringsmetod</i>	33
4.5.1.3.	<i>Aktiveringsnivå</i>	34
4.5.1.4.	<i>Säkerhetsstrategi</i>	34
4.5.2.	Utskov aktiverat automatiskt av vattenståndet	34
4.5.2.1.	<i>Eroderbar dammdel aktiverad av högt vattenstånd</i>	34
4.5.3.	Utskov aktiverat genom teknisk åtgärd	35
4.5.3.1.	<i>Eroderbar dammdel aktiverad genom teknisk åtgärd</i>	35
4.6.	Ekonomiska aspekter	36
4.6.1.	Allmänt	36
4.6.2.	Jämförelse mellan fuseplug och alternativa lösningar	37
4.6.2.1.	<i>Kostnad för fuseplug jämfört med ytutskov med fast tröskel i betong</i>	37

4.6.2.2. Kostnader för fuseplug jämfört med hävertutskov	38
5. SLUTSATSER	39
5.1. Fördelar och nackdelar	39
5.1.1. Fördelar	39
5.1.2. Nackdelar	39
5.1.2.1. Vissa speciella nackdelar	39
5.1.2.2. Negativ psykologisk effekt	40
5.2. Förutsättningar i Sverige	40
5.2.1. Konsekvenser nedströms	40
5.2.2. Tjäle	41
5.3. Dammsäkerhetsaspekter	41
5.3.1. Riskbedömningsaspekter	41
5.3.2. Säkerhetsaspekter	41
5.4. Standardisering	42
5.4.1. Behovet och typen av fuseplug	42
5.4.2. Utformning	42
6. REFERENSER	43
7. BILAGOR	47

FÖRORD

Vattenkraftutbyggnaden och därmed byggande av stora dammar startade i stor skala i Sverige efter andra världskriget och var mest omfattande under 50- och 60-talen.

Principerna för utformning och konstruktion av dammanläggningarna under denna intensiva utbyggnadsperiod äger i huvudsak sin giltighet fortfarande.

Vad avser krav på utskovens avbördningsförmåga har dessa föreslagits av dammägarna och (efter eventuella justeringar) fastställts av vattendomstol med SMHI som sakkunnig. Kriterierna i detta avseende kan därför sägas ha etablerats gemensamt av dammägarna och SMHI.

Under 1980-talet ifrågasattes i Sverige, såsom tidigare skett i många andra länder, de etablerade principerna för utskovsdimensionering. Flödeskommittén, som tillsattes av kraftindustrin och SMHI för att utreda flödesriskerna, föreslog i sin slutrapport ett nytt sätt att beräkna dimensionerande tillrinning. Kriterierna innebär att dammar med allvarliga brottkonsekvenser skall kunna klara ett påtagligt högre tillflöde än vad man tidigare räknat med.

För att på ett säkert och kostnadseffektivt sätt kunna anpassa dammbeståndet till de nya kraven har ett stort antal utredningar och utvecklingsprojekt genomförts. Dessa projekt har genomförts på uppdrag av VASO dammkommitté, som är kraftindustrins gemensamma organ i dammsäkerhetsfrågor och bland annat har till uppgift att samordna dammarnas anpassning till de nya riktlinjerna. Den styrgrupp som lett arbetet har bestått av Harald Eriksson – Sydkraft, som varit ordförande, Sten Lasu – Svenska Kraftverksföreningen, Lennart Markland – Vattenregleringsföretagen samt Malte Cederström och Urban Norstedt – Vattenfall.

För varje projekt finns en rapport och därtill finns en sammanfattande rapport över hela arbetet, huvudrapporten (nr 1), vilken även innehåller en sammanställning över de rapporter som ingår i serien.

Projektet beträffande fuseplug har genomförts av Michaela Dan, KTH – Vattenbyggnad och i dess styrgrupp har Klas Cederwall – KTH, Urban Norstedt – Vattenfall samt Harald Eriksson – Sydkraft ingått. I projektet har därutöver Karl Rytters – VBB Anläggning AB och Hans Bergh – KTH deltagit.

Föreliggande rapport har utarbetats av Michaela Dan, KTH – Vattenbyggnad i nära samarbete med Malte Cederström, Vattenfall Vattenkraft, som även varit beställarens representant.

Vid anpassningen av befintliga dammar till Flödeskommitténs riktlinjer kan vid vissa dammar kompletterande utskovskapacitet eller reservutskov komma att erfordras. I dessa fall kan en fuse plug, t ex en eroderbar dammdel, vara ett alternativ. I rapporten analyseras förutsättningar för detta liksom för- och nackdelar med denna lösning.

VASO dammkommitté

SAMMANFATTNING

Föreliggande projekt har utförts som en generell analys av utskov av typ fuse plug och dess möjligheter till användning som kompletterande avbördningsanordning vid befintliga svenska dammar. Fuse plug är en mindre känd och använd typ av utskov och därför har tonvikt lagts på att definiera begreppet ”fuse plug”, redogöra för de typer av fuse plug som finns, samt beskriva existerande fuse plug. Fuse plug av jord- eller stenfyllning (eroderbara dammdelar) har av flera orsaker beskrivits mer detaljerat.

Den viktigaste delen av rapporten utgörs av rekommendationer om hur en eroderbar dammdel bör utformas när den byggs vid en befintlig damm och hur analysen som leder till val av en fuse plug som utskov bör genomföras. De för svenska dammar specifika förhållandena har beaktats genom hela projektet. Till exempel medför de svenska vinterförhållandena komplikationer vid användning av fuse plug (långvarig tjalning), något som hittills är föga studerat i ett sådant sammanhang.

Några av slutsatserna angående användning av fuse plug för utökning av avbördningskapaciteten eller reservutskov vid befintliga svenska dammar är följande:

Tillämpningen av Flödeskommitténs riktlinjer kan leda till att avbördningskapaciteten vid några riskklass I-dammar behöver höjas eller att reservutskov rekommenderas. Då de flesta av dessa anläggningar är försedda med luckor är de kompletterande utskov eller reservutskov lämpligast som automatiskt träder i funktion eller som har ett aktiveringssystem som är oberoende av de befintliga utskovens. Utskov av typ fuse plug kan därför vara lämpligt på grund av sitt sätt att fungera.

Stort fribord hos dammen eller möjlighet att enkelt och billigt utöka det blir ett avgörande villkor för tillämpning av fuse plug vid befintliga dammar.

De talrika faktorer som påverkar valet av utskovstyp samt mängden olika fenomen som styr en säker funktion hos en fuse plug gör att varje fall behöver studeras för sig innan man kan rekommendera en fuse plug som utskov. Teoretiska studier av fuse plugens funktion (t ex om den kommer att aktiveras som planerat), tekniska och juridiska aspekter (accepterade skador nedströms, konsekvenser av oavsiktlig aktivering) utgör vanligtvis viktiga moment i lämplighetsanalysen för en fuse plug, särskilt när den byggs vid en befintlig damm. Som analysmetod är detta inte unikt för en fuse plug men det är viktigare för denna typ av utskov än för dem som är väl utprovade.

Olika problemställningar och lösningar som här berörs i samband med fuse plug (t ex erosionsskyddet nedströms) kan väl användas vid andra typer av utskov eller för att studera genomströmning genom dammar. Studierna av funktionen hos en eroderbar dammdel kan också vara av värde vid dammbrottsanalys och för dammsäkerhet i allmänhet.

SUMMARY

This project consists of a general analysis of the fuse plug spillway and of its possibility as auxiliary spillway at existing Swedish dams in connection with the application of the new Swedish guidelines regarding floods. Erodible dams as a particular type of fuse plug have been considered as being most appropriate for use under Swedish conditions and are therefore described in more detail in the report.

The report gives recommendations on design of fuse plugs that are to be built at existing dams. The report also shows how to conduct the analysing and the choice of which type of spillway is most appropriate as auxiliary spillway. Problems less studied and specific for Swedish conditions, e.g. freezing of the material, as well as new problems appearing when a fuse plug is implemented at an existing dam are also mentioned.

Some of the recommendations and conclusions in the report are as follows:

As a result of the on-going river regulation calculations according to the new Swedish guidelines regarding floods some of the dams may be used for flood dampening and others may need to be provided with an increased discharge capacity.

In cases where the discharge capacity has to be increased, the choice of a fuse plug as complementary spillway may be advantageous if the floods passing over it have a return period of more than 100 years. The advantages are a generally lower cost as well as the fact that the fuse plug activation system is independent of the main spillway activation system and usually automatic (self-acting).

The required discharge capacity during design floods has to be unconditionally available at all times. To assure this, redundant systems for activating the gates' opening systems may be used. An alternative solution could be to build an emergency spillway, for instance a fuse plug with an automatic activation system, independent of the activation system of the main spillway.

Many parameters and circumstances determine the choice of solution, especially when building auxiliary spillways at existing dams, and therefore each case has to be studied individually. Besides the technical and economical aspects there are also juridical problems that have to be clarified as well as psychological effects on the population surrounding the dams. The fact that the experience of building and exploiting fuse plugs is limited makes the analysis of this solution more difficult compared to others.

Other areas considered as being of general interest by their connection to the use of fuse plugs have also been treated in this report as well as separately analysed elsewhere in the present series of reports.

1. INLEDNING

1.1. Bakgrund

Flödeskommitténs riktlinjer innebär att ökade krav i många fall ställs på dammarnas avbördningsförmåga eller på flödesdämpningen. Därför har det uppstått ett förnyat intresse för användning av utskovsanordningar av fuse plug-typ tillsammans med de traditionella utskoven med luckor som en både säker och ekonomisk lösning. Fördjupade studier beträffande dammbrott och dammsäkerhet har också lett till bättre förståelse för funktionen hos fuse plug av jord- eller stenfyllning – också kallade eroderbara dammdelar.

1.2. Målsättning

Föreliggande projekt har utformats med syftet att studera funktionen hos fuse plug och möjligheterna att använda fuse plug som hjälputskov för utökning av avbördningskapaciteten hos svenska dammar. Projektet avses täcka både ingenjörsmässiga och forskningsinriktade frågeställningar.

De ingenjörsmässiga delarna bör ge indikationer på när användandet av fuse plug kan vara lämpligt vid svenska dammar, hur olika typer bör utformas, vilka problem som kan förekomma före och efter aktiveringen samt möjliga praktiska lösningar.

Insatserna på forskningssidan innebär identifiering av de problem som inte på ett enkelt sätt kan förutses samt när användningen av rutinmässiga beräkningar blir osäker eller helt bör undvikas. Behovet av fortsatt forskning belyses också.

1.3. Relaterade projekt

Utskov av fuse plug-typ är relativt lite kända och använda. Deras funktion och säkerhet grundas på flera svårkontrollerbara mekanismer som transport av sediment och genomströmning av granulärt material. Därför har det befunnits lämpligt att beskriva denna typ av utskov från olika synpunkter i tre olika projekt som riktar sig till olika målgrupper:

1. Fuse plug – en metod att öka avbördningskapaciteten hos befintliga svenska dammar (föreliggande rapport),
2. Studie beträffande eroderbar dammdel vid Seitevare [1],
3. Eroderbar dammdel – utformning och beräkningsmetodik (underlag till rapport)[2].

Föreliggande rapport är en allmän presentation av utskov av fuse plug-typ och riktar sig främst till dammägare men också till konsulter.

I studien om en eroderbar dammdel vid Seitevare-dammen i Lilla Lule älv har den hypotetiska möjligheten att bygga en fuse plug av typ eroderbar dammdel studerats. Projektet utfördes för att visa en konkret ingenjörsmässig tillämpning samt med utgångspunkt från de praktiska förutsättningarna i ett verkligt dammläge demonstrera ett mer

generellt sätt att angripa och strukturera problemet. Avsikten har dock endast varit denna och någon eroderbar dammdel planeras inte att byggas vid Seitevare.

I [2] diskuteras och rekommenderas de beräkningsmetoder som krävs vid projektering av en eroderbar dammdel. Tonvikten läggs på de senaste framstegen inom respektive område i ett försök att förmedla några forskningsresultat till projekteringen. Projektet är en mer teoretisk genomgång och diskussion av olika beräkningsmetoder och riktar sig till dem som är verksamma i projektering och som har eller vill få en viss specialisering inom erosions- och transportfenomen.

1.4. Medverkande

Beträffande särskilt de tekniska frågeställningarna har Vattenfall Vattenkraft, Vattenfall Hydropower AB, Vattenregleringsföretagen samt Sydkraft AB och VBB Anläggning AB försett mig med dokumentation och värdefull information genom samtal och synpunkter om projektet.

Karl Rytters har givit ett särskilt värdefullt bidrag till projektets planläggning och verklighetsanknytning. Inom de forskningsinriktade delarna har arbetet följts och stötts av mina handledare vid KTH, professor Klas Cederwall och lektor Hans Bergh.

Ett permanent stöd och översikt över framskridandet av projektet som helhet har skett genom periodiska möten med styrgruppen bestående av Urban Norstedt – Vattenfall Vattenkraft, Harald Eriksson – Sydkraft AB och Klas Cederwall – KTH. I projektet har även Karl Rytters – VBB Anläggning AB och Hans Bergh – KTH deltagit.

Föreliggande rapport har utarbetats i nära samarbete med Malte Cederström – Vattenfall Vattenkraft vad gäller såväl tekniska aspekter som språkligt.

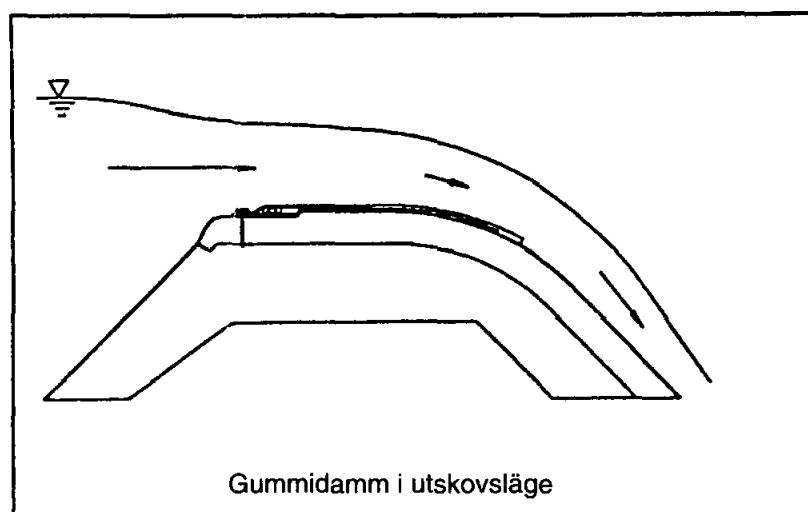
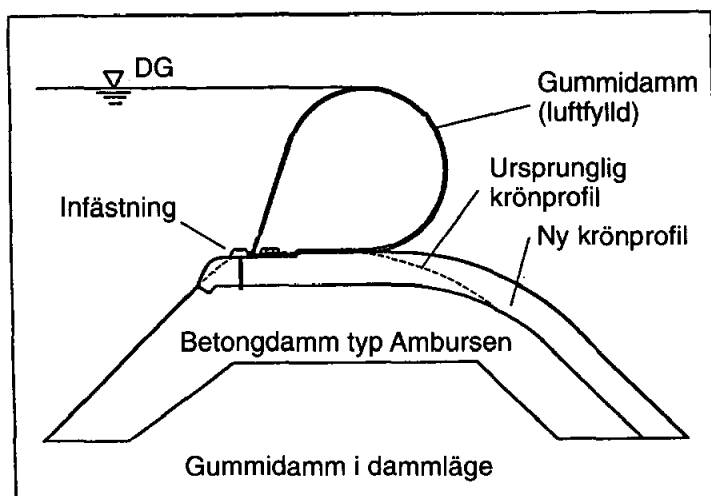
2. ALLMÄN ÖVERSIKT

2.1. Definition av begreppet fuse plug

Ett utskov som träder i funktion genom att dess avstängningsanordning helt eller delvis förstörs kallas "fuse plug" (eng.) eller "digue (déversoir) fusible" (franska). På svenska kan detta översättas till reservutskov med förstörbar avstängning eller eroderbar dammdel när en fuse plug gjord som en jord- eller stenfyllning avses. I denna rapport används benämningen **fuseplug** i fortsättningen.

Några typer av fuseplug av olika utförande visas i kommande figurer. Figur 1 visar en fuseplug i form av en gummidamm och figur 3 visar en fuseplug med tippande luckor. Figurerna 2, 5 och 6 visar olika typer av eroderbara dammdelar.

Aktiveringen sker i allmänhet automatiskt då vattenytan i magasinet stiger över en viss nivå, men kan också kräva teknisk åtgärd.



Figur 1. Gummidamm.

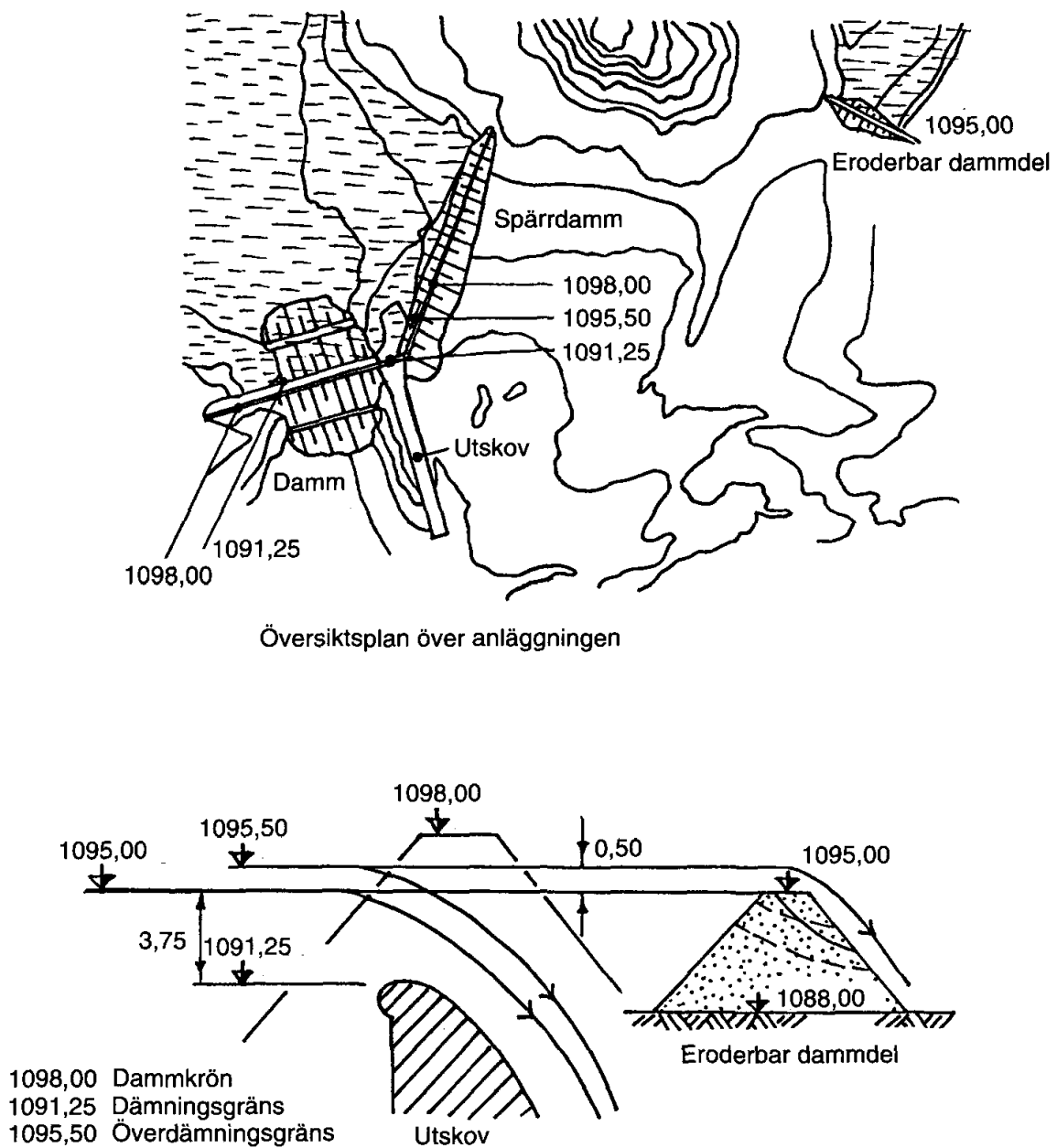
2.2. Typer av fuseplug

Materialet som används vid utformning av avstängningssystemet delar fuseplug-utskoven i två typer som skiljer sig markant med avseende på funktionsprincipen:

- Fuseplug av jord- eller stenmaterial också kallad eroderbar dammdel.
- Fuseplug av stål eller betong.

Aktiveringsprincipen, alltså mekanismen som sätter i gång öppningsprocessen, delar de olika varianterna av denna typ av utskov i:

- Fuseplug som aktiveras av högt vattenstånd.
- Fuseplug som kräver teknisk åtgärd för aktivering.



Figur 2. Typiska nivåer för krön hos eroderbar dammdel, damm och utskov – Guaceriquedammen, Honduras.

2.2.1. Eroderbar dammdel

Fuseplug av typ eroderbar dammdel kommer att studeras särskilt i fortsättningen på grund av följande drag:

- De kan vara lämpliga för användning som reservutskov hos svenska dammar.
- Deras funktionssätt är komplext, flera tekniska lösningar finns.

Med komplext funktionssätt menas här att de erosions- och transportprocesser som styr funktionen hos en eroderbar dammdel har olika karaktär och förekommer i skiftande kombinationer. Att förutse och kontrollera dem kräver goda teoretiska kunskaper om alla inblandade fenomen. Jämförelse med liknande fall samt modellförsök kan behövas.

2.2.2. Fuseplug av stål eller betong

Fuseplug av stål, betong eller annat material än jord eller sten består av konstruktioner utförda så att de aktiveras automatiskt eller helt enkelt förstörs, vanligtvis genom sprängning, när vattenytan i reservoaren når en viss nivå. Även hos dessa fuseplug kan två typer särskiljas med utgångspunkt från aktiveringsprincipen.

2.2.2.1. Fuseplug med aktivering genom högt vattenstånd

Denna typ tillhör kategorin av fuseplug som aktiveras automatiskt av högt vattenstånd och består vanligtvis av konstruktioner i stål eller betong som på ett mekaniskt sätt välts omkull när vattenytan överstiger en viss nivå. De flesta förstörs inte och i vissa fall kan de åter sättas på plats.

En av dessa typer av fuseplug tillverkas under det kommersiella namnet HydroPlus (se figur 3, sidan 6). Den konstrueras som en skarpkantad fast tröskel sammansatt av flera delar tillverkade i stål. Delarna innehåller ett tomt utrymme utformat på så sätt att vid en viss nivå i reservoaren fylls det med vatten varvid tyngdpunktens läge förflyttas så att de blir instabila och välter. Innan dess fungerar anordningen som ett utskov med fast tröskel genom att tillåta vattnet rinna över den översta kanten. För att maximera den totala avbördningen har tröskelns kant i plan en sickackform. Kostnaderna för denna typ av fuse plug i stål uppskattas till 30 à 50% lägre än för vanliga luckor enligt [3].

2.2.2.2. Fuseplug med aktivering som kräver teknisk åtgärd

Fuseplug av stål, betong eller andra material som kräver teknisk åtgärd för aktivering innebär enkla konstruktioner som vid behov avlägsnas genom att förstöras.

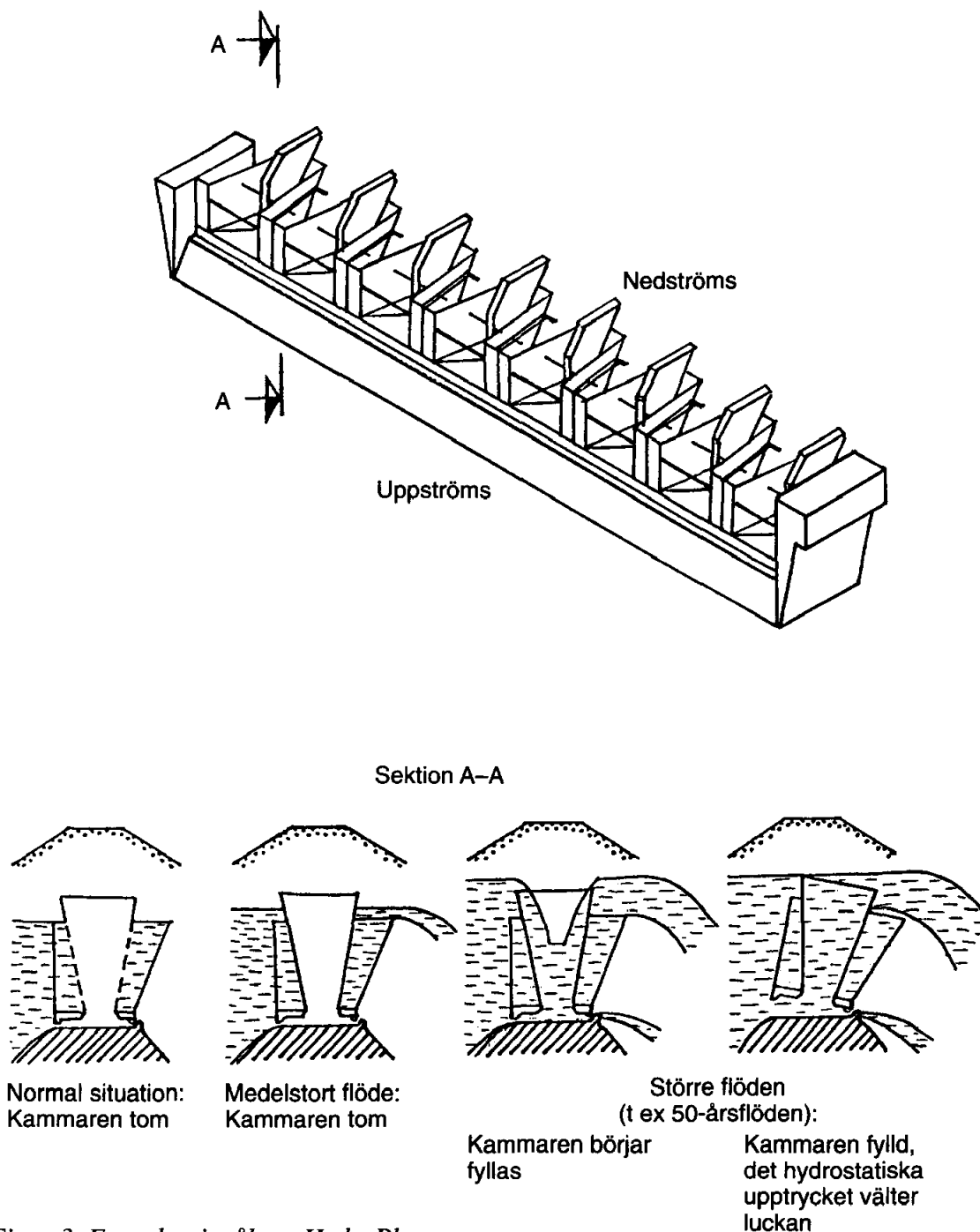
Den vanligaste typen består av en betongvägg som sprängs för att låta vattnet passera. Sprängladdningarna placeras på i förväg valda platser.

Dessa typer av fuseplug är enkla att utföra och kan aktiveras på avstånd. Faran för oavsedd aktivering är låg. Dessa fördelar gör att de kan användas i lägen som är besvärliga för andra

typer av fuseplug, till exempel smala dalgångar, svårtillgängliga för en aktivering utförd på ett annat sätt.

2.3. Vattenvägen

Vattenvägen består av en kanal som leder avbördat vatten nedströms om en fuseplug samt av energiomvandlaren och eventuella skyddsåtgärder mot översvämningar. Vattenvägens utformning beror inte på typen av fuseplug. Däremot kan i vissa fall lösningar som analyseras här för användning nedströms om ett utskov av typ fuseplug även tänkas tillämpas nedströms om vanliga utskov.



Figur 3. Fuseplug i stål typ HydroPlus.

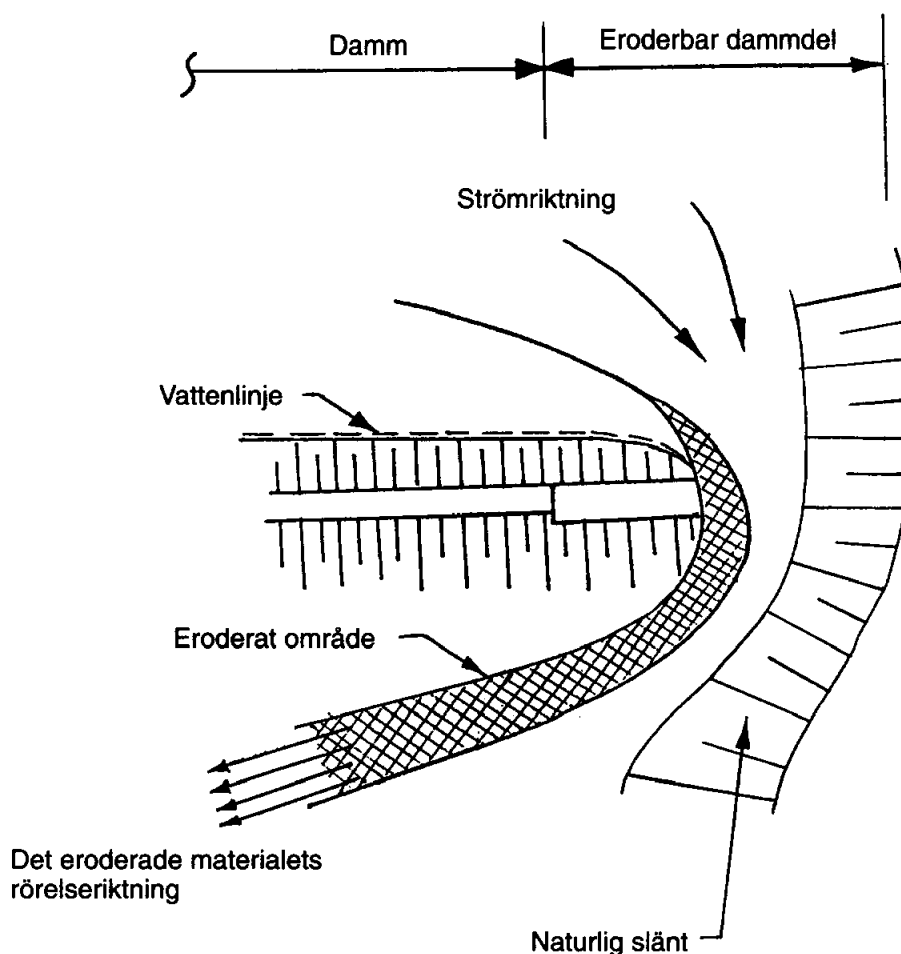
2.3.1. Utformning

Vattenvägen nedströms en avbördningsanordning kan vara:

- Den naturliga dalgången i vilken dammens utskov avbördar, i regel med skydd mot erosion.
- En annan (erosionsskyddad om nödvändigt) naturlig dalgång.
- En kanal som leder vattnet till en naturlig dalgång.

Vattenvägen kan bestå av en kanal i de fall när en fuseplug är lagd i en sänka i terrängen som inte är en älvfåra samt när en fuseplug är byggd i eller nära en av dammens anslutningar till stranden (se avsnitt 3.6.5).

När placeringen av en fuseplug i dammen är asymmetrisk i förhållande till älvfåran, till exempel intill ena sidan i dalgången, kan risk finnas att utflödet från den eroderbara dammdelen avlänkas i sidled och spolar över intilliggande dammtå (jfr. figur 4 från [4]) och Oxbowexperimetet [5]). Bakåtskridande erosion kan på detta sätt uppstå i dammtån och därmed även angripa dammen relativt snabbt. Åtgärder måste vidtas för omdirigering av vattnet med betongväggar mot dammen eller i nedgrävd kanal.



Figur 4. Avlänkning av avbördad vattenföring – eroderbar dammdel vid Kbandammen, Turkiet.

Vattenvägen bör utformas på så sätt att flödets benägenhet att orsaka skador lokalt nedströms om en fuseplug reduceras så mycket som möjligt hellre än att öka nedströms-partiets erosionstålighet, genom t ex att skydda den med betong vilket kan vara dyrare och sämre ur miljösynpunkt (jfr. bilaga A). Detta kan uppnås genom flera metoder:

- mindre lutning och/eller större bredd hos vattenvägen,
- större friktionskoefficient (genom val av lämpligt erosionsskydd),
- utlösning av fuseplug i flera steg,
- flera mindre fuseplug byggs som leder vattnet i skilda älvfåror,

Om en fuseplug kan utformas så att den aktiveras etappvis vid olika vattenstånd kommer flödet att stiga långsammare (flackare hydrograf erhålls). Denna utformning kräver samtidigt att två eller flera fuseplug, som aktiveras av olika vattenstånd i magasinet, får plats i vertikalled. Ett sådant system kan genomföras om tillräcklig överdämning alternativt avsänkning av magasinet tillåts.

Ett annat och kanske mer tillförlitligt alternativ skulle vara utförandet av två fuseplug, en med hydraulisk aktivering och en aktiverad genom teknisk åtgärd. Den senare typen av fuseplug behöver inget fribord för aktivering och följaktligen kräver denna lösning samma plats i vertikalled som en enda fuseplug.

2.3.2. Energiomvandling

Förekomst av vattensprång men också enbart överkritisk strömning med hög hastighet nedströms om en fuseplug kan medföra kraftig erosion som kan sprida sig mot dammen (bakåtskridande erosion). I sådana fall lär en energiomvandlare vara nödvändigt. Energiomvandlare nedströms en fuseplug skiljer sig från energiomvandlare nedströms vanliga utskov genom följande faktorer:

- större erosionsrisk, till följd av stor och oreglerbar vattenföring
- transport av eroderat material under inledningsskedet (abrasiva och dynamiska effekter) om aktuell fuseplug är en eroderbar dammdel
- låg användningsfrekvens.

Låg användningsfrekvens innebär att vissa skador kan accepteras. Mindre kostnader per enhet omvandlad energi och i förhållande till fuseplugens totala kostnader än för vanliga anordningar bör uppnås. Dessa premisser utesluter av ekonomiska skäl lösningar som innebär en traditionell energiomvandlare i betong (t ex ”stilling pool”). Undantag kan vara de fall när den befintliga energiomvandlaren kan utnyttjas.

Alternativa lösningar är minskning av vattenhastigheterna eller framtvingande av en kraftig ökning av energiförlusterna längs hela vattenvägen genom val av lämpligt erosionsskydd, till exempel stegformat erosionsskydd (se figur 13 i bilaga A).

2.3.3. Erosionsskydd

Som regel väljs erosionsskyddet med hänsyn till den förväntade vattenhastigheten, typ av naturligt bottenmaterial som skall skyddas och tillgängligt skyddsmaterial. Andra faktorer specifika för de förhållanden som förekommer nedströms om utskov av typ fuseplug gör att mer anpassade metoder för att skydda vattenvägen mot erosion bör väljas. Dessa faktorer är:

- större ytor måste erosionsskyddas,
- energiomvandlare bör undvikas (oftast alltför dyr lösning),
- vissa skador kan accepteras.

De större ytor som bör erosionsskyddas nedströms om en fuseplug gör att stora bassänger för energiomvandling, betongbeklädnad av olika slag samt avlägsnande av lösa sediment oftast blir för dyrt.

2.3.3.1. *Erosionsskydd av lösa eller sammankopplade element*

Erosionsskydd av lösa eller sammankopplade element (se bilaga A) placerade över ett filterskikt (sten- eller geofilter) kan vara lämpliga lösningar. Som erosionsskydd av lösa element kan nämnas sprängsten (riprap) och betongelement i olika utformningar. Gabioner, madrasser av stål- eller plastnät (geonät) fyllda med sten och betongblock ihopkopplade med wire är exempel på erosionsskydd av sammankopplade element.

Dessa typer av erosionsskydd minskar också behovet av dyra energiomvandlare genom att deras råa ytor orsakar stora energiförluster. Stenblock eller betongelement av samma storleksordning som vattendjupet ger upphov till den så kallade storskaliga råheten. Strömning över storskalig råhet sker med större energiförlust än över vanlig råhet och bör uppskattas med andra beräkningsmetoder, vilket beskrivs närmare i [2].

2.3.3.2. *Erosionsskydd med stegformade ytor*

En annan typ av erosionsskydd som väsentligt bidrar till energiomvandlingen är den med stegformade ytor. Här är både effekten av den storskaliga råheten och luftinblandningen större än för alla andra typer av erosionsskydd.

Erosionsskydd med stegformade ytor kan byggas av prefabricerade betongelement eller tillverkas av betong av låg kvalitet, så kallad stegformad vältbetong eller "Roller-compacted concrete - RCC". Båda dessa typer av erosionsskydd har också hög erosionsbeständighet men de är också dyrare än andra metoder ([6], [7], [8], [9]). Därför rekommenderas stegformade erosionsskydd mest för relativt begränsade ytor där skador inte kan accepteras (t ex nära dammen).

De tål lägre hastigheter än vanlig betong på grund av betongens lägre kvalitet och den kavitation som kan åstadkommas av stegutformningen, men ändå högre än andra typer av skydd. Mindre skador påverkar dock inte funktionen.

2.3.3.3. Övriga typer av erosionsskydd

Flera andra mindre konventionella metoder finns som till exempel cementbunden jordfyllning ("soil cement"), geotextiler och gräs samt kombinationer av geotextiler eller betong-element och gräs.

Med undantag för vanlig betongbeklädning och RCC-skyddet har alla övriga erosionskydd som här nämnts ytor med hög permeabilitet. Detta sänker väsentligt den hydrauliska gradienten och trycket under skyddet samt bevarar den naturliga genomströmningen genom att påverka den lokala miljön mindre.

Typen av erosionsskydd kan varieras längs vattenvägen nedströms om en eroderbar dammdel för att bäst anpassas till rådande hastighet i sektionen, turbulenseffekter från vattensprång eller den acceptabla nivån på förväntade erosionsskador. Flera uppgifter om olika typer av erosionsskydd (t ex hur höga hastigheter de tål), finns i bilaga A.

3. ERODERBARA DAMMDELAR

3.1. Funktionsprincip

En fuseplug av jord- eller stenmaterial är utförd som en liten jord- eller stenfyllningsdamm som lätt och på ett kontrollerat sätt eroderas bort då vattenståndet i magasinet stiger över en viss nivå. Därför kallas denna typ av fuseplug på svenska för eroderbar dammdel.

Vid normala vattenstånd måste den uppfylla samma eller liknande funktion som dammen i övrigt. Säkerhetskravet på en fuseplug kan dock få vara lägre än för en damm eftersom en oförutsedd felaktig aktivering bör ge jämförelsevis begränsade skador.

Efter det att den eroderbara dammdelen har spolats bort skall den så skapade öppningen fungera som ett utskov med fast tröskel. Principen bygger på fyllningsdammarnas välkända oförmåga att utan speciellt skydd motstå överströmning, fenomen som har observerats vid dammbrott och modellförsök.

3.2. Avbördningskapacitet

Specifik avbördning (q), dvs avbördning per breddenhet genom ett utskov med fast tröskel är relaterad till överfallshöjden (H) och avbördningskoefficienten (m) enligt avbördnings-ekvationen:

$$q = m \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot H^{3/2} \quad (1)$$

Den *överfallshöjd* som i praktiken kan utnyttjas är begränsad av variationsmöjligheterna för magasinets vattenyta (överdämning, avsänkning) vilket medför att den i de flesta fall blir relativt liten. Den minsta lämpliga överfallshöjden begränsas av risken för igensättning av utskovet med drivgods (t ex med träd) [10].

Avbördningskoefficienten beror i huvudsak på utformningen av utskovets tröskel. De flesta typer av fuseplug kan försees med betongtrösklar med en utformning som ger hög avbördningskapacitet. Av orsaker som nämns i avsnitt 3.6.5.3 rekommenderas denna typ av betongtröskel dock inte för eroderbara dammdelar om tröskelns krön behöver placeras under dämningssgränsen. I stället placeras vanligtvis den eroderbara dammdelen ovanpå en fyllningsdamm med stor längd i strömningsriktningen eller i en kanal med små nivåskillnader mellan uppströms- och nedströmsvattenytorna. Detta gör att i de flesta fall efter det att den eroderbara dammdelen har spolats bort strömning över bred tröskel erhålls och avbördningskoefficienten blir ganska låg i jämförelse med vanliga utskov. Låg specifik avbördning medför att den erforderliga bredden hos en eroderbar dammdel blir stor. Låg specifik avbördning har däremot den fördelen att vattenhastigheten och följaktligen också erosionsförmågan blir ganska låg.

Osäkerhet om den exakta avbördningskapaciteten som kommer att erhållas beror på huvudsakligen två saker. Först råder en viss osäkerhet om den exakta storleken och utformningen hos den eroderbara dammdelens borteroderade öppning och följaktligen om utskovets verkliga längd längs krönet. Samtidigt är avbördningskoefficienterna hos utskov med bred tröskel mindre utforskade och kartlagda än hos andra typer utskov.

Inströmningsmönstret till ett utskov med mycket långt krön kan också bidra till en minskning av avbördningskoefficienten i en grad som beror på hur fuseplugen är placerad i relation till terrängen och resten av dammen. Vissa typ vågskydd, som t ex vågbrytare, kan också bidra till en minskning av avbördningskoefficienten. Verkan av alla dessa faktorer på storleken av avbördningskoefficienten är svår och osäkert att beskriva på teoretiskt väg. Viss hjälp kan fås från modellförsök och mer sofistikerade numeriska program (t ex "FLUENT")

3.3. Utformning

En eroderbar dammdel består alltid av:

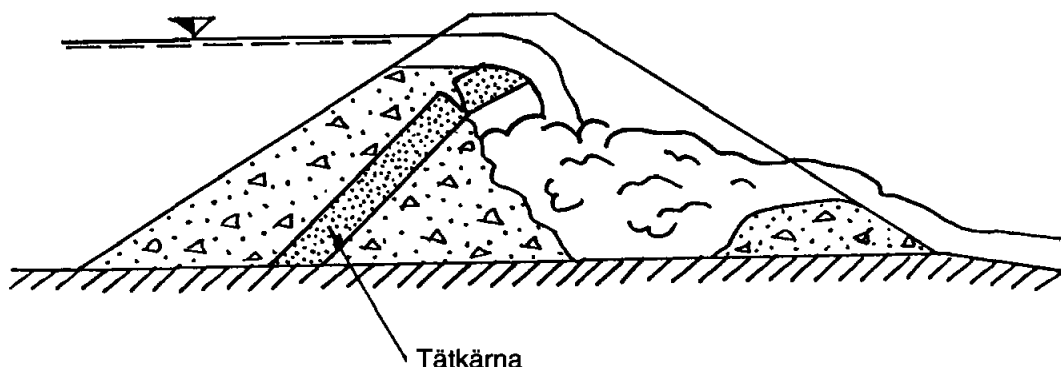
- en eroderbar del (dvs fyllningen), en tätande del och (ibland) aktiveringsanordningar,
- tekniska anordningar mot oönskad erosion.

Utgångspunkter för utformningen av den eroderbara delen som nivåer för dammkrönet, tätkärnans krön och det överliggande filtret beror på vilken aktiveringsmetod som tillämpas och kommer därför att behandlas i respektive avsnitt 3.4. Utformningen liksom val och placering av materialet beror på typ av tätningsanordning. Tätningsanordningarna kan vara av tre slag:

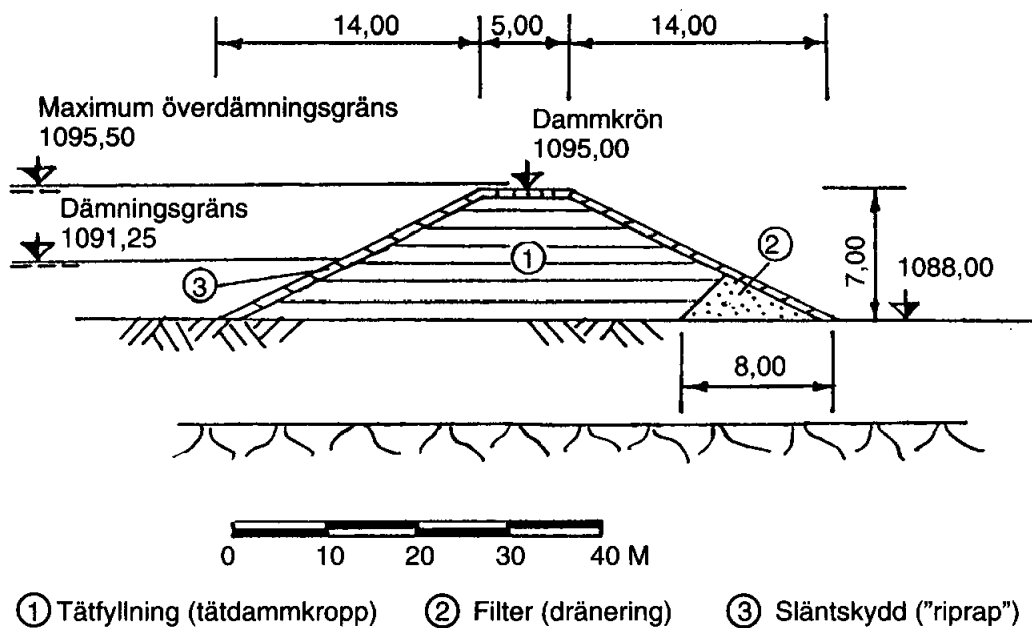
- centralt placerat tätande element,
- tätskikt placerat på uppströmsslänten,
- homogen jordfyllning.

Kohesivt material eller morän är mycket erosionstålga. Däremot bryts en lutande tätkärna av dessa material av under inverkan av vattnets tryck och sin egen vikt när stödmaterialet bakom har eroderats bort (figur 5). Den centralt placerade tätkärnan i en eroderbar dammdel brukar vara av lera men kan också bestå av gummiduk (geomembran).

Enligt försök vid US Bureau of Reclamations i Denver [11] och i samband med dammbygget i Oxbow [5] har tätkärnans dimensioner eller materialets hållfasthet ingen nämnvärd påverkan på erosionsprocessen om tätkärnan lutar och den eroderbara dammdelen i övrigt är korrekt konstruerad och utförd (dvs att materialet bakom tätkärnan lätt kan eroderas och transporteras bort).



Figur 5. Erosionsmekanismen.



Figur 6. Typisk sektion hos en homogen eroderbar dammdel.

En gummiduk (geomembran) kan användas som tätande element. Den kommer att falla ned och överströmmas när stödfyllningen bakom är eroderad och borttransporterad. Denna typ av tätningsanordning behöver inte skyddas mot tjäle om rätt typ används. Följaktligen erfordras mindre överdämning för att överströmma denna eroderbara dammdel. Försök rörande den lämpligaste placeringen av en gummiduk som del av det tätande elementet i en "pilot channel" vid Center Hills eroderbara dammdel har genomförts i modell [12]. Eroderbar dammdel med gummiduk som tätande element kan vara lämplig att användas vid befintliga dammar som annars skulle behöva ett tjockt tätskikt över tätkärnan som skydd emot tjäle.

I övrigt byggs en eroderbar dammdel enligt samma principer som en vanlig fyllningsdamm. Den kan bestå av lutande tätkärna och grövre stödmateriel avgränsat från tätkärnan av filter eller av ett homogent material med låg permeabilitet (figur 6). Båda varianterna har erosionsskydd på slänterna. Stödfyllningens dimensioner och sammansättning är bestämmande för erosionshastigheten när erosionen väl påbörjats. Därför bör den göras av mer lätteroderbart material än vid vanliga fyllnadsdammar, till exempel ensgraderat och med stor permeabilitet.

3.4. Aktiveringsmetoder

3.4.1. Aktiveringsprinciper

Eroderbara dammdelar skiljer sig efter tillämpad aktiveringsprincip enligt klassificeringen som nämndes i avsnitt 2.2. Avgörande för funktionen hos en eroderbar dammdel är att erosionsprocessen igångsätts när så skall ske. En kombination av två eller flera aktiveringsmetoder rekommenderas för förbättrad säkerhet i detta avseende.

3.4.1.1. Aktivering genom högt vattenstånd

Aktivering genom högt vattenstånd är en erosions- och transportprocess orsakad av vattnet som strömmar över och genom eller enbart genom den eroderbara dammdelen. Tekniska lösningar finns för att säkerställa den eroderbara dammdelens aktivering genom högt vattenstånd. Aktivering kan åstadkommas med eller utan initieringsanordningar.

3.4.1.2. Aktivering genom överströmning

Överströmning av en oskyddad fyllning leder till dess nederodering. Överströmning av ett permeabelt material innebär samtidigt en viss genomströmning som underlättar erosionsprocessen. Nackdelen med denna typ av aktivering är att den kräver större fribord för dammen än andra aktiveringsmetoder.

3.4.1.3. Aktivering genom genomströmning

Genomströmning initierar erosionsprocessen i vissa eroderbara dammdelar genom att först erodera och transportera bort material från de inre delarna av den eroderbara dammdelen. Detta kan uppnås enligt de principer som redovisas i avsnitt 3.4.3 med hjälp av lämplig krönutformning eller ”piping devices”.

3.4.1.4. Aktivering genom teknisk åtgärd

Aktivering genom teknisk åtgärd beskrivs i avsnitt 3.4.4.

3.4.2. Aktivering utan initieringsanordningar

3.4.2.1. Aktivering genom överströmning

Erosionsprocessen initieras av överströmning över hela den eroderbara dammdelens krön. Nederoderingen förväntas utvecklas jämnt längs hela krönet. En sådan erosionsutveckling kan uppstå endast om den eroderbara dammdelens krön har samma nivå över hela sin längd och fyllningen karaktäriseras av en jämt fördelad erosionsbenägenhet. Om nederoderingen inte sker så jämnt leder detta bara till att erosionsprocessen på en eller flera platser sker fortare och kanaler av typ ”pilot channel” skapas. Den eroderbara dammdelen fungerar i detta fall på liknande sätt som en eroderbar dammdel med initieringsanordningar av typ ”pilot channel” (se avsnitt 3.4.3) och aktiveringen tar något kortare tid.

Funktionssättet innebär att den eroderbara dammdelen skall börja överströmmas vid en vattenyta i magasinet som inte är farlig för dammen i övrigt. Detta innebär att den vattenyta som aktiverar den eroderbara dammdelen i praktiken bör ligga under dammens krön med ett avstånd lika med det erforderliga fribordet. Under normala driftförhållanden varvid den eroderbara dammdelen fungerar som en del av dammen, bör vattenytan ligga under den eroderbara dammdelens krön med ett avstånd som också är lika med ett valt fribord. Följaktligen blir avståndet mellan dammens krön och dämmningsgränsen lika med summan

av dammens och den eroderbara dammdelens fribord (se figur 2). På detta sätt blir erforderligt avstånd mellan dammens krön och dämmningsgränsen betydligt större än för andra typer av utskov. En av de få eroderbara dammdelar som hittills har fungerat som utskov, Mnjoli i Swaziland [13], hade en aktivering av denna typ.

Det kan observeras att dammens fribord under aktiveringstiden kan beräknas med mindre säkerhetsmarginaler än vanlig med tanke på det korta tidsintervallet och de extrema förhållandena. Tex kan högre vågor med lång återkomsttid få slå över dammens krön om denna situation har analyserats ur säkerhetssynpunkt (se VASO rapport nr 12 i denna serie, [14]). Avståndet mellan dammens krön och dämmningsgränsen kommer ändå inte att avsevärt reduceras på detta sätt.

3.4.2.2. Aktivering genom speciell krönutformning

Om filterkriterierna mellan det ovanför tätkärnan placerade finfiltret och det grövre överliggande filtret med tillräcklig marginal inte uppfylls kommer vattnet som överströmmar finfiltret att erodera och transportera bort det. Det grövre materialet kommer att sjunka ner, bli genom- och överströmmat och borttransporterat. Det beskrivna förloppet föreslås här som en ny möjlighet för erosionsinitiering i en eroderbar dammdel. Denna nya metod grundar sig på försök och teoretiska studier av genomströmning med materialtransport över tätkärnan i en fyllnadsdamm (se [15], [16], [17]). Mer studier krävs för att bekräfta metodens lämplighet under de förhållanden som kan uppnås i verkligheten (graderat material). Fördelen med denna metod är att mindre fribord krävs för dammen i jämförelse med andra metoder. Den höjning av vattnets nivå över dämmningsgränsen som behövs för initiering blir summan av det erforderliga fribordet för den eroderbara dammdelens tätkärna, sandfiltrets tjocklek och en viss överfallshöjd (några få decimeter) för överströmning av sandfiltret.

3.4.3. Aktivering med initieringsanordningar

Initieringsanordningar brukar orsaka en lokal erosionsprocess som utvecklar sig relativt fort i vertikalled och framför allt i sidled, vilket bekräftats i flera modellförsök ([5], [18] samt försök vid KTHs Vattenbyggnadslaboratorium). De vanligaste tekniska lösningarna för att erhålla denna typ av aktivering hos en eroderbar dammdel är (begreppen anges på engelska eftersom lämpliga uttryck saknas på svenska):

- "pilot channel",
- "piping device" (eller "triggering device"),
- andra typer av initieringsanordningar.

3.4.3.1. Aktivering med "pilot channel"

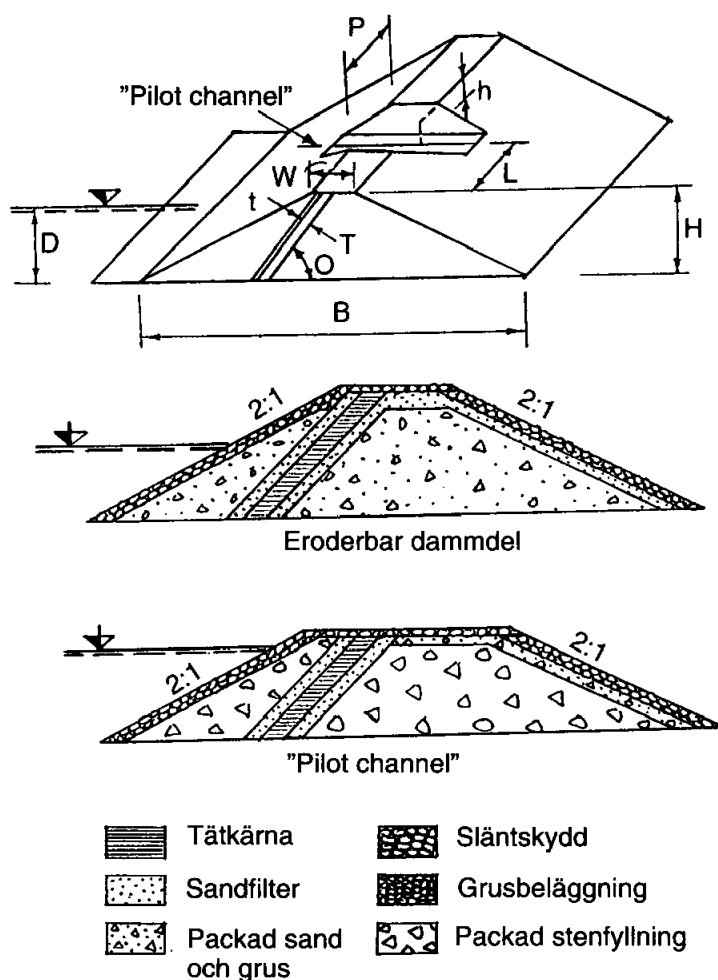
En "pilot channel" är den sektion i den eroderbara dammdelen som är avsedd att erodera först. Detta uppnås genom att krönet lokalt är placerat på en lägre nivå än resten av den eroderbara dammdelen (figur 7 och 8) och utfört av mer lätteroderbart material än resten av den eroderbara dammdelen. Den eroderbara dammdelen kan då ha krönet i övrigt på samma nivå som resten av dammen.

Den eroderbara dammdelen aktiveras genom överströmning av sektionen med "pilot channel". I denna del utvecklar sig erosionen snabbt i sidled. Denna aktiveringsmetod är en förbättring av den vanliga överströmningsmetoden genom att den begränsar riskfaktorer som lägre krön och mycket erosionsbenäget material till en smal sektion av den eroderbara dammdelen. Det blir då lättare och billigare att underhålla och eventuellt reparera denna sektion. Skyddsåtgärder mot vågor kommer också att begränsas till ett mindre område.

Behovet av större fribord för dammen gäller på samma sätt som för vanlig initieringsmetod genom överströmning. "Pilot channel" har tillämpats för den eroderbara dammdelen vid Oxbowdammen [5], i laboratorieförsök i Turkiet (Kebandammen, [4], se figur 8) och vid USBR Research Center i Denver, USA [11]. Ett av de viktigaste målen med de ovannämnda experimenten var att erhålla ett empiriskt samband för beräkning av erosionshastigheten, speciellt erosionsutvecklingen i sidled efter det att initieringsskedet har avslutats. Dessa samband kan tillämpas enbart vid liknande hydrauliska gradienter och utformningar hos den eroderbara dammdelen.

3.4.3.2. Aktivering med "piping devices"

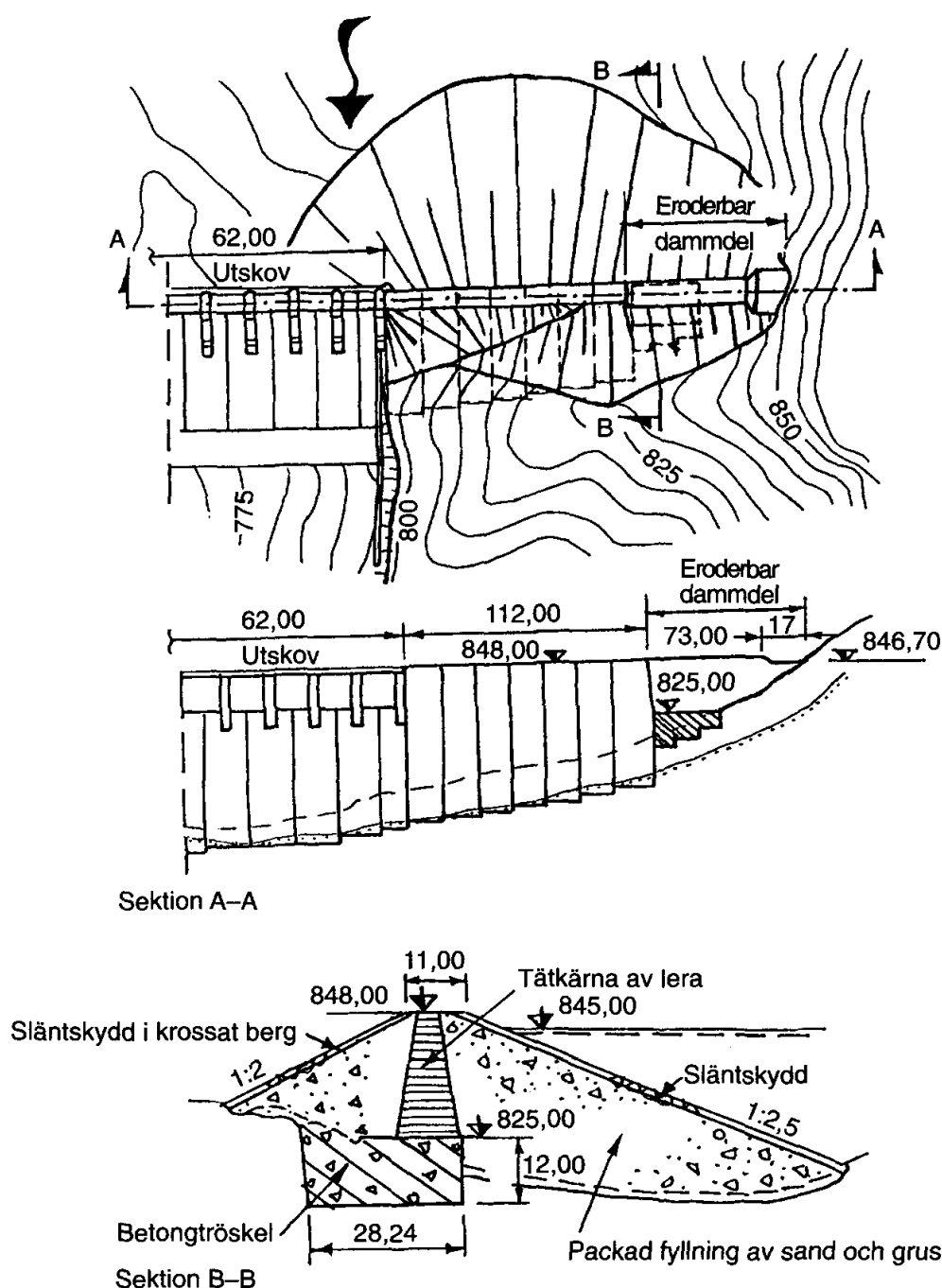
"Piping devices" kallas de speciella anordningar som sätter i gång aktiveringsmekanismen genom inre erosion. Det brukar vara små anordningar utplacerade på tätkärnan i den eroder-



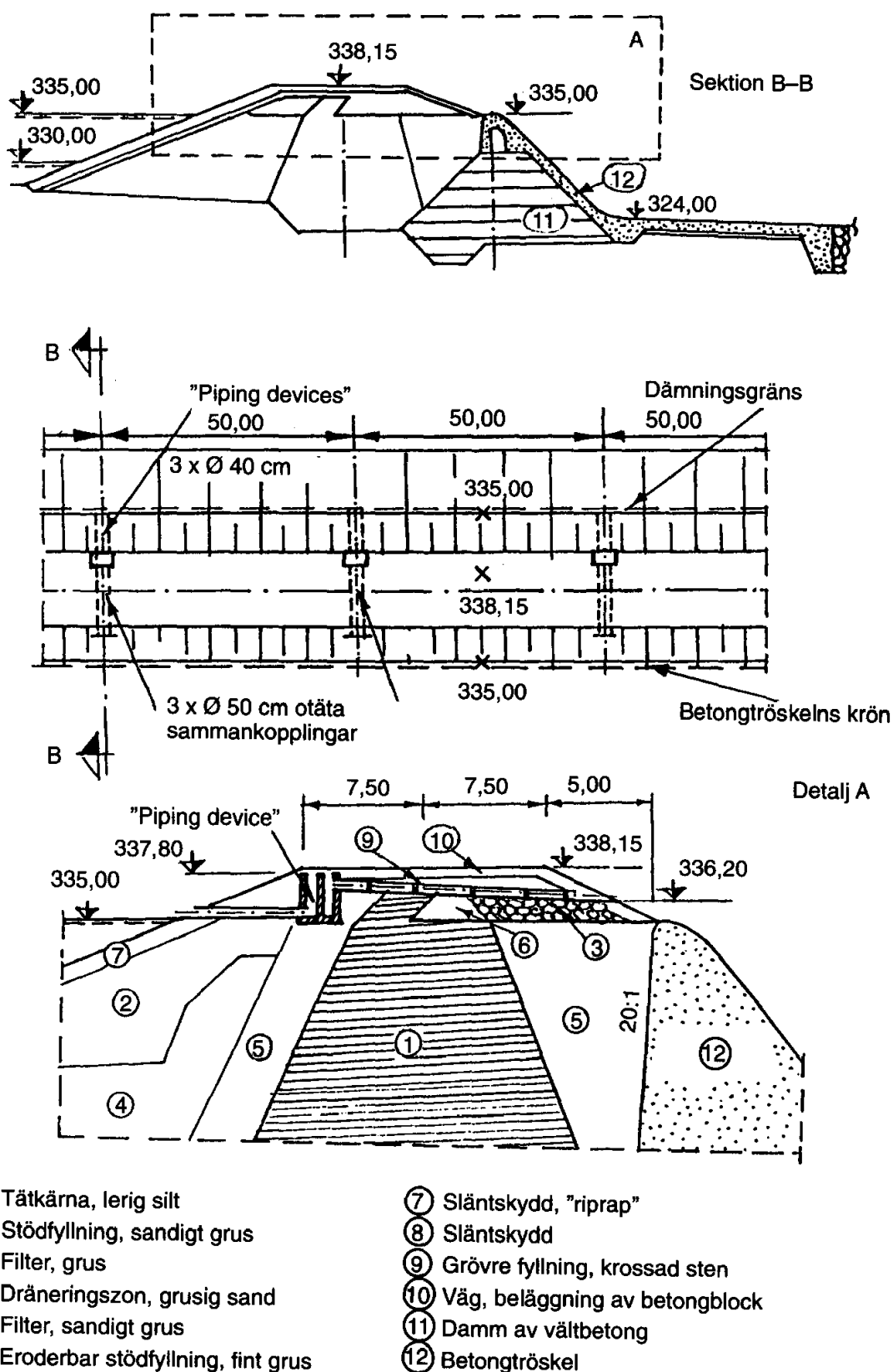
Figur 7. Typisk sektion för eroderbar dammdel och "pilot channel".

bara dammdelen så att de genom rör kan leda vattnet nedströms om tätkärnan, när vattenytan i magasinet har stigit över en viss nivå. Där orsakar denna "läcka" lokal inre erosion med materialtransport ("piping") som utvecklar sig som en bakåtskridande erosionsprocess. Härigenom skapas en kanal genom dammens hela tvärsektion och detta leder till initiering av den eroderbara dammdelens borterobering.

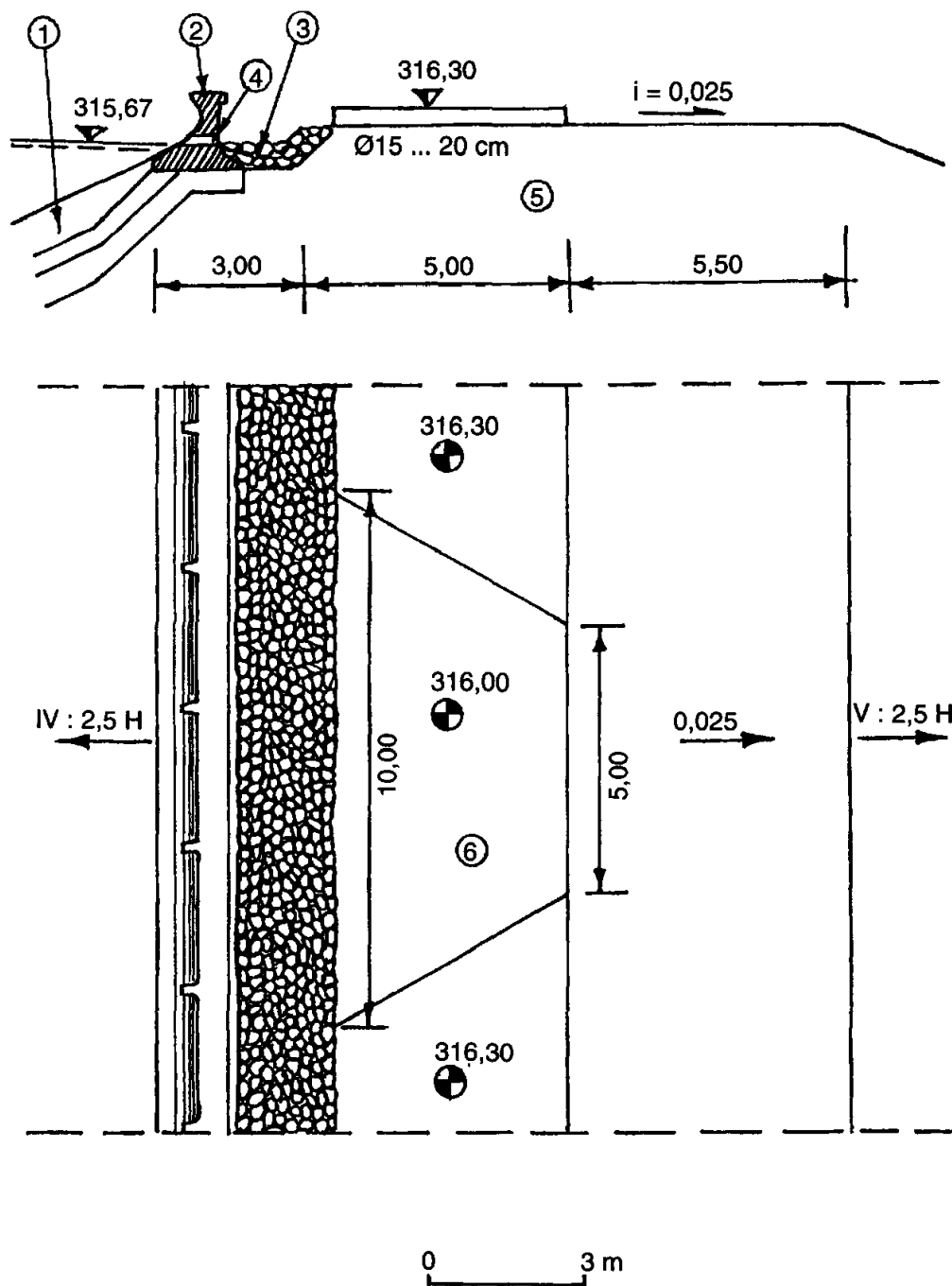
Rörens nedströmsdel är genomborrade av hål eller är sammansatta av flera segment utan tätning emellan. På detta sätt sprids vattnet över ett visst område inom den eroderbara dammdelen. Som framgår av figur 9, behöver dammens fribord ökas enbart med höjden mellan rörets uppströmsände och dämmningsgränsen vilket anses nödvändigt för att undvika oavsedd aktivering. Detta avstånd inkluderar inte tillfälliga höjningar av vattenytan på



Figur 8. Eroderbar dammdel vid Kebandammen, Turkiet.



Figur 9. Eroderbar dammdel vid Mosuldammen, Irak.



- ① Släntskydd av grövre material
- ② Vågskydd i form av parapet
- ③ Kanal av stenfyllnad
- ④ Kanaler perforerade i parapetet ("Weep hole") $\varnothing = 0,15 \text{ m}$
- ⑤ Eroderbar fyllning
- ⑥ Konvergerande kanal

Figur 10. Initieringsanordning – eroderbar dammdel vid Chocondammen.

grund av vågor. En speciell anordning placeras därför på rörets uppströmssida för att motverka vågornas effekt (se avsnitt 3.6.2). Rören utgör känsliga komponenter för den eroderbara dammdelens funktion eftersom de kan sättas igen om erforderligt underhåll uteblir. De kan också leda kyla ner i fyllningen. Även is kan bildas i dessa rör och sätta igen dem, deras hål eller anslutningar. Uppvärmningssystem kan vara tänkbart i sådana fall.

Trots dessa nackdelar förblir ändå denna aktiveringsmetod en av de intressantare på grund av den stora frihet som den erbjuder att välja vattennivå för aktivering utan att kräva ökat fribord hos dammen. Dessutom kan det område där initieringen skall påbörjas bestämmas på förhand. En eroderbar dammdel utrustad med en initieringsanordning med perforerade rör har aktiverats och fungerat som förväntat vid Seneca pumpkraftverk i Pennsylvania, USA [19].

3.4.3.3. Aktivering med hjälp av nedsänkta kanaler

Aktivering med hjälp av nedsänkta kanaler är en mer sällsynt metod. Denna typ av aktivering verkar genom en överströmning av den eroderbara dammdelen på vissa förberedda ställen. En sådan aktiveringsmetod tillämpades hos den eroderbara dammdelen vid Chocondammen i Argentina [20] och kan ses i figur 10, där man bakom murar för skydd mot vågor gjorde en sänkt kanal parallell med den eroderbara dammdelens krön. I direkt anslutning till denna grävdes på enstaka platser kanaler ner till en nivå lägre än den eroderbara dammdelens krön för att leda vattnet över det lokalt nedsänkta krönet. Vattnet leds till nedströmsslänten när vattenytan i kanalen bakom muren har nått en viss förutbestämd nivå. Vattnet från magasinet rinner bakom muren genom hål som borrats i den.

I plan fick dessa kanaler en trapetsutformning med minskande bredd mot nedströmssidan. Trapetsformen gör att flödet koncentrerar sig mot kanalens nedströmsdel och får en större eroderande verkan.

Andra tekniska detaljlösningar kan på liknande sätt utarbetas för aktiveringssystem rörande fuseplug.

3.4.4. Aktivering genom teknisk åtgärd

Denna typ av aktivering innebär att en eller flera kanaler med lägre nivåer än den högsta acceptabla i magasinet skapas på den eroderbara dammdelens krön om extra avbördning behövs. Detta görs i de flesta fall med hjälp av en grävmaskin (Lossendammen, Sverige) eller genom sprängning. Sprängämnet placeras omedelbart före aktiveringen i utrymmen som anordnats i förväg inne i den eroderbara dammdelen (Mosul Dam, Irak [21]). På detta sätt uppnås överströmning och erosion längs dessa kanaler. Den lokala erosionen utvecklar sig efteråt i sidled på samma sätt som hos ovan beskrivna eroderbara dammdelar. Ibland utgör teknisk åtgärd ett reservalternativ till andra aktiveringsmetoder.

En enkel betongmur som stänger en utskovsöppning och vid behov kan sprängas är den enklaste typ av fuseplug som aktiveras genom teknisk åtgärd. Denna typ förekommer i Sverige.

3.5. Åtgärder för att säkerställa eroderbarhet

3.5.1. Faktorer som påverkar erosionsprocessen

Erosionens hastighet och spridning beror på den hydrauliska gradienten, typen av använt material och dess placering. Nederoderingen av en eroderbar dammdel innefattar även rasfenomen. Således får också stabilitetsparametrarna hos fyllningen, dvs dess geometri och inre friktionsvinkel betydelse. Därför bör till exempel den maximala släntlutningen som säkerställer den eroderbara dammdelens stabilitet under normala förhållande (innan aktiveringen sker) bestämmas.

Den tillgängliga hydrauliska gradienten vid en damm är som högst nivåskillnaden mellan det högsta acceptabla vattenståndet i magasinet och vattenståndet nedströms om dammen dividerad med fyllningens längd i strömriktningen. Det är önskvärt med en stor hydraulisk gradient eftersom denna påskyndar processen. Samtidigt begränsas den hydrauliska gradienten av givna förhållanden vid den aktuella (befintliga) anläggningen som skall utrustas med eroderbar dammdel.

*Material*et påverkar erosionsprocessen genom:

- sammansättning (gradering som kan ge filterbildning),
- kornstorlek (möjlighet att transporteras),
- utplacering inom den eroderbara dammdelen.

Material med en kornstorleksfördelning som avviker betydligt från filterkriterierna (till att vara ensgraderat) och användning av mindre kornstorlekar underlättar erosionen och transporten av eroderat material.

Tjäle som uppkommer i fyllningen innebär att porvatten omvandlas till is. Detta har två konsekvenser för fyllningen:

- mindre erosionsbenägenhet under tjälperioden (porerna fylls av is och permeabiliteten sjunker),
- risk för försämrade packningsgrad (upprepade frysning och upptining kan leda till uppluckring).

Medan den först nämnda konsekvensen kan äventyra den eroderbara dammdelens utskovsfunktion kan den andra underlätta erosionen. För ren sand och grus innebär tjälbildningen ingen strukturförändring, eftersom volymökningen endast blir 9% [22]. Områden som finns inom den eroderbara dammdelens fyllning på större djup än nedträngningsdjupet bevarar samma erosionsbenägenhet även under vintern. Om vatten vid en viss nivå har möjlighet att penetrera till detta parti och spola bort det, förlorar möjligtvis andra tjälade delar av den eroderbara dammdelens struktur sitt stöd och kommer att falla ner och transporteras bort. Bedömningen av detta förlopp beror i hög grad på hur verklighetsnära man kan uppskatta tjälspridningen i den eroderbara dammdelens fyllning. Det är följaktligen viktigt att tidigt under projekteringen klarställa om en fuseplug kan behöva aktiveras under perioder med tjäle.

3.5.2. Åtgärder

3.5.2.1. Materialval och placering

Nederoderingen av en fyllning har en bakåtskridande utveckling. Därför bör mycket erosionsbenäget material alltid placeras i den eroderbara dammdelens nedströms liggande partier.

3.5.2.2. Bevarande av hög genomsläpplighet

De delar som är avsedda att ha stor genomsläpplighet måste omges med filter för att motverka porernas igensättning med finare material så att den önskade erosionen kan uppstå. Filtren bör placeras mellan de genomsläppliga delarna och tätkärnan, den naturliga terrängen samt släntskyddet. För att säkerställa deras funktion kan dessa filter byggas upp av ett större antal skikt. Filterskikten kan också göras tjockare än vanligt, så att eventuella inre skador inte märkbart påverkar filtrets funktion. Geotextiler rekommenderas i kombination med vanliga granulära filter mellan den eroderbara dammdelen och dammen eller den naturliga grunden. De är mer erosionståliga än de rent granulära och bör därför användas över ytor som skall skyddas vid överströmning.

Om risken för betydligt mindre erosionsbenägenhet genom isbildning i porerna finns bör den eroderbara dammdelen skyddas mot tjälbildning. Detta kan göras på liknande sätt som för fyllningsdammar under byggnad vintertid [23]:

- isolering (ungefär 1 m täcke av snö + lös jord, isolerande markskivor),
- uppvärmning – vid långvarig, stark kyla (elektriska värmekablar).

3.6. Åtgärder för att förhindra skadlig erosion

Erosion inom den eroderbara dammdelen före aktivering skall undvikas. Erosion kan också sprida sig mot grundläggningen eller mot delar av dammen som inte är avsedda att eroderas. Den senare typen av erosion kan ske såväl före som efter aktiveringen. Omfattande erosion nedströms om dammen, nära den eller längs älvfåran skall också undvikas. Risken för denna typ av erosion finns för alla typer av fuseplug och har behandlats i avsnittet 2.3.3. Skadlig erosion vid eroderbara dammdelar kan förebyggas genom olika metoder, varav några redovisas nedan.

3.6.1. Materialets utplacering

Erosionskänsligt material placerat nedströms om tätkärnan utgör en viktig förutsättning för att en eroderbar dammdel skall fungera. Samtidigt är detta en riskfaktor under tiden den eroderbara dammdelen är avsedd att fungera som del av dammen. För tidig erosion undviks huvudsakligen genom att vattnet hindras komma i kontakt med de erosionsbenägna delarna.

Detta görs genom att reducera läckagen så mycket som möjligt (mer än för en vanlig damm) eller genom att inte placera erosionskänsligt material för nära de delar som har större risk att få större läckage eller som genomströmmas under normala förhållanden.

Mindre genomsläpplighet hos tätningsanordningen kan uppnås främst genom att den byggs av material av bättre kvalitet. I viss utsträckning kan också tåtkärnans tjocklek ökas med hänsyn till att detta inte nämnvärt påverkar erosionsprocessen, enligt försöken i Denver [11] och Oxbow [5].

Skydd av erosionsbenäget material. Material med stor erosionsbenägenhet bör inte placeras för nära släntytan med hänsyn till risken för bortspolning under kraftig nederbörd eller tillfällig vågöverspolning. Nedströmsslänten bör skyddas väl och helst bör ett filter placeras mellan skyddslager och fyllningen av erosionsbenäget material.

3.6.2. Vågskydd

Uppströmsskydd. För en eroderbar dammdel utrustad med central tåtkärna kan fyllningen uppströms om tåtkärnan nås av extremt höga vågor. Därför bör detta parti utformas som vid en vanlig damm. När tåtkärnan bryts ner kommer i alla fall denna del att rasa och bortspolas även om den inte är byggd för att vara lätt eroderbar. Modellförsöket som genomfördes för den eroderbara dammdelen tillhörande Mosuldammen har bekräftat denna utveckling [24].

Skydd mot överspolning. Hos en eroderbar dammdel har fyllningen bakom tåtkärnan som regel lätt att erodera och därför bör överspolning av krönet helst undvikas. Följaktligen måste skyddet mot vågor som överspolar krönet och tåtkärnan genomföras med större noggrannhet och säkerhetsmarginaler än för vanliga dammar. Samtidigt bör större höjd än den signifikanta våghöjden väljas för de dimensionerande vågorna. Framhållas bör dock att denna dimensionering i huvudsak har en ekonomiskt syfte, eftersom en oavsiktlig utlösning av en fuseplug normalt inte utgör en fara för dammen (men väl ett snabbt ökat flöde).

Ett rejält vågskydd uppbyggt av större block placerade över uppströmsslänten bör dock undvikas eftersom dessa block har svårt att borttransporteras när den eroderbara dammdelen aktiveras. Skydd mot vågor kan istället göras lokalt med skyddsmurar placerade på den nedsänkta delen av krönet eller med vågbrytare placerade framför den eroderbara dammdelen, om läget tillåter detta. Om flera lämpliga lägen finns för placering av en eroderbar dammdel, bör det läge väljas som på naturligt sätt är mest skyddat mot vågor eller lättast kan skyddas mot dem. Murar som vågskydd ovanpå krönet samt en okonventionell typ av vågbrytare beskrivs i bilaga C.

Utgjämning av vågor. Anordningar för utgämning av vattenytans variationer ("water level control shaft") används främst för anordningar som leder vattnet över tåtkärnan till de partier som är avsedda att erodera först (se avsnitt 3.4.3). För aktivering genom inre erosion är sådana anordningar utformade som i figur 9.

3.6.3. Krafter från is

Ett istäcke på vattenytan längs en eroderbar dammdel kommer att utöva tryck mot dess uppströmsslänt genom temperaturutvidgning. Det tenderar också att dra släntskyddet med sig nedåt längs slänten när vattenytan i magasinet sjunker. Den nödvändiga erosionsbenägenheten hos den eroderbara dammdelen innebär vågskydd av block med mindre vikt och en tillräckligt stor släntlutning. Båda dessa faktorer leder till sämre förmåga att motstå krafterna från is.

Istrycket minskas om den eroderbara dammdelens uppströmsslänt får en mindre lutning. En mindre lutning är också ett bra skydd mot vågor eftersom den ger mindre uppspolningshöjd. En mindre lutning hos uppströmsslänten anses inte nämnvärt försämra erosionsbenägenheten.

För att förkorta den tid under vilken bildas is framför den eroderbara dammdelen kan den byggas på ett ställe med öppen vattenyta framför sig. Om detta inte är möjligt bör vågskydd användas. Den negativa effekten av den kraft som utövas av is som följer med vattenyta ner ska inte motverkas genom att välja större dimensioner för de stenblock eller betongelement som placeras över uppströmsslänten. Stora, tyngre block försämrar erosionsbenägenheten hos den eroderbara dammdelen. En utformning eller/och placering av de element som utgör skyddet som leder till en bättre låsning mellan elementen kan väljas i stället.

Metoderna för att motverka isbildning som används för att undvika is framför luckorna kan också tänkas tillämpas om det anses att faran för skador hos den eroderbara dammdelen är stor eller en utformning av den eroderbara dammdelen som motverkar iskrafterna blir för dyr.

3.6.4. Tåtkärna

Tåtkärnan inom den eroderbara dammdelen är, särskilt när den består av lera, känslig för tjälning och uttorkning.

3.6.4.1. Tjåle

Uppkomst av tjåle sker inom en tåtkärnan av lera om skyddet mot kyla är otillräckligt. Då kan vintertid bildas vattenlinser som tinar bort under varmare perioder och kan efterlämna ett system av sprickor (se [25]). Vid befintliga dammar med krav på liten eller ingen avsänkning av reservoarens nivå under dåmningsgrånsen kan endast låga eroderbara dammdelar byggas. Deras tåtkårnor av lera blir fóljaktligen låga. Detta medför att tåtkårnans egen vikt kan vara otillräcklig för att stånga igen dessa sprickor. Således bör stor uppmårksamhet ågnas åt tåtkårnans skydd mot kyla.

3.6.4.2. Uttorkning

Uttorkning kan förekomma om en tåtkårna av lera eller morån har partier som normalt ligger över vattnets nivå och enbart under vissa perioder (överdåmning) ligger under vattnet. När vattnet ligger lågre torkar tåtkårnan ut och sprickor kan uppkomma. Det finns lite forskning om förekomsten av sprickor och läckage i samband med uttorkning trots att problem som kan sättas i samband med uttorkning av tåtkårnan redan kan ha uppkått vid dammar. Oavsett av vad som har orsakat dem kan det uppkomna systemet av sprickor leda till koncentrerat läckage genom tåtkårnan. Läckaget sker huvudsakligen genom dessa partier med hög konduktivitet och därför är vattenhastigheten inom sprickorna större än vid vanligen förekommande genomströmning genom homogent material. Således kan inre erosion av tåtkårnan lättare uppkå här. Denna utveckling kan leda till högre genomströmning och fóljaktligen inre erosion inom nedströmsfyllningen. Koncentrerad genomströmning och resulterande inre erosion är inte tillfredstållande beskrivna hittills och beråkningsmetodiker som finns bortser från inhomogena material. Samtidigt bör mindre genomströmning ån

annars eftersträvas eftersom stödfyllningen hos en eroderbar dammdel i regel består av lättroderbart material. Särskilt i dessa fall bör därför nuvarande beräkningsmetodik ifrågasättas och mer forskning och kompetensutveckling behövs.

3.6.4.3. Åtgärder

Uppkomst av tjäle i tät kärnor av lera eller morän brukar förhindras med skydd i form av fyllning. Mot uttorkning av tät kärnan finns inte specifika förebyggande metoder eller skyddsåtgärder. Reglering utan eller med minimal variation av vattenytan i magasinet kan hjälpa men förefaller orealistiskt att tillämpas i praktiken enbart av detta skäl. Åtgärder mot både uttorkning och tjäle kan vara:

- utförande av tät kärna av material som inte är känsligt för uttorkning eller tjäle (vissa typer av gummiduk),
- utformning av den eroderbara dammdelen som en homogen lättroderbar fyllning utan tätskikt.

Om den eroderbara dammdelens tröskel ligger över eller litet under dämningsskärns gränsen behövs inget tätskikt. Sådana utformningar är möjliga om den eroderbara dammdelen är låg och bred i strömriktningen (små gradienter erhålls i dess fyllning). Filterskikten på uppströms- och nedströmsslänten ska vara korrekt dimensionerade. En sådan eroderbar dammdel har beräknats och visats sig möjlig för ett studerat fall.

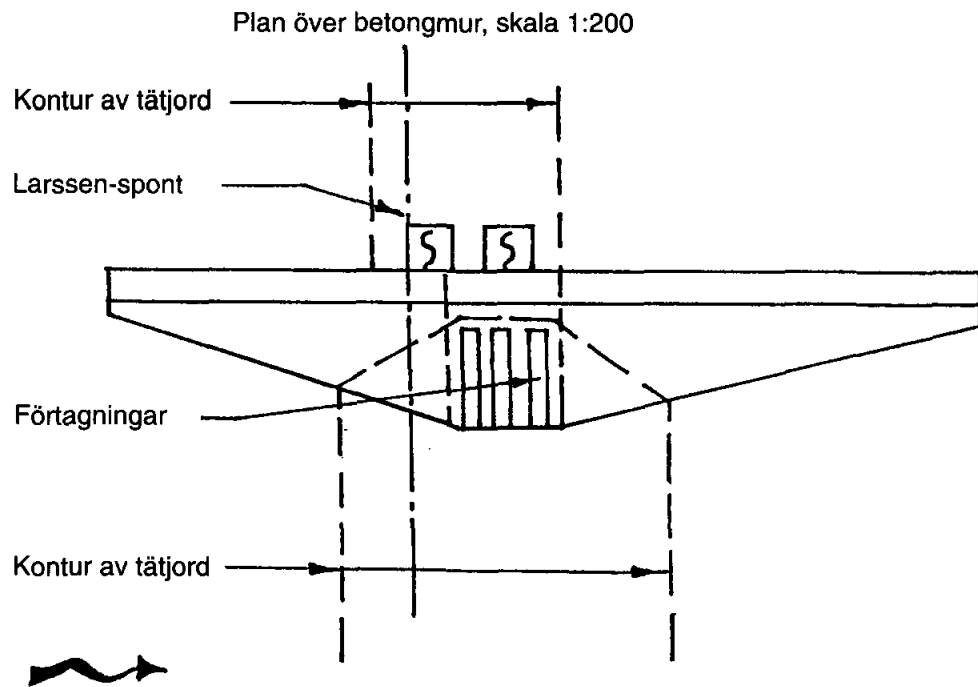
3.6.5. Erosionsskydd av omgivande damm

De vanligaste åtgärderna mot skadlig erosion av den omgivande dammen innebär en erosionsbeständig tröskel under den eroderbara dammdelen och någon form av erosionsskydd mellan den eroderbara delen och resten av dammen. Både tröskeln och ett av dessa erosionsskydd mot dammen kan ersättas genom en lämplig placering på en naturlig berggrund och vid en erosionsbeständig sidoslänt.

3.6.5.1. Skiljevägg av betong

Skiljevägg av betong kan bäst motstå stora vattenhastigheter och de ras som förekommer under den eroderbara dammdelens nederodering. Samtidigt undviks effektivt att eventuell inre erosion och andra problem som kan inträffa före aktiveringen sprider sig från den eroderbara dammdelen till dammen. Nackdelen med att använda en fast skiljevägg är att det kan uppstå mer genomsläppliga ytor vid kontakten med fyllningen än fyllningen skulle ha haft själv. En spontvägg placerad endast på murens sida mot dammen minskar denna oönskade genomströmning. Som skydd mot ökad genomsläpplighet bör muren få en lutande yta (se figur 11) mot den eroderbara dammdelen.

En högre permeabilitet uppstår alltid längs kontaktytor mellan ett granulärt material och en betongvägg på grund av geometrin, en lokalt sämre packning och ojämna sättningar. Ojämna sättningar uppstår genom valveffekter om betongväggen är vertikal eller nästan vertikal. En annan orsak till högre permeabilitet längs kontaktytorna mellan betong och jord



Figur 11. Skyddsmur mellan den eroderbara dammdelen och dammen, Håckrendammen.

kan vara negativ effekt på tätmaterialiet av den av betongväggen överförda kylan. Denna högre permeabilitet bör särskild beaktas eftersom nedströmsfyllningen hos en eroderbar dammdel är byggd för att vara känsligare till erosion än en vanlig damm.

3.6.5.2. Förankrat nät

Förankrat nät kan användas för att skydda både tröskeln och de vertikala ytorna mellan den eroderbara dammdelen och resten av dammen eller slänten. Tröskelns skydd bör förankras i tätkärnan, t ex med en spont. Nätet samt förankringarna bör bestå av rostfritt stål eller plast (geonät). Förankrat nät är alltid att föredra framför erosionsskydd i form av konstruktioner i betong eftersom det inte skapar ytor med högre permeabilitet och därmed läckvägar. Erosionsskydd av detta slag användes längs hela konturen mellan den eroderbara dammdelen och resten av dammen (även som tröskel) vid Chocondammen i Argentina [20].

3.6.5.3. Betongtröskel

Om tröskeln är placerad under magasinets vattenyta (dämnings- eller överdämningsgränsen plus snedställningen) bör tröskelns yta täckas med betong enbart mellan nedströmsslänten och den centralt placerade tätkärnan. Denna åtgärd syftar till att motverka uppkomst av en mer genomsläpplig yta över tröskeln mellan uppströms- och nedströmsslänterna.

4. KRITERIER VID VAL AV FUSEPLUG

4.1. Allmänt

Utskov av typ fuseplug som ny avbördningskapacitet vid en befintlig damm kan innebära särskilda tekniska och ekonomiska problem.

Fuseplug är en mindre vanlig typ av utskov och har inte byggts vid befintliga dammar. Utskov av typ fuseplug bör därför väljas i enlighet med vad som beskrivs i det följande förutsatt att fuseplugens utformning har studerats tillräckligt och att den med rimlig säkerhet kan antas fungera som planerat.

En fuseplug har vissa specifika egenskaper som särskilt bör beaktas vid tillämpning:

- utflödets hydrograf kan inte påverkas efter det att aktivering har skett (utom genom att stänga andra luckförsedda utskov),
- låg användningsfrekvens (skador kan accepteras nedströms),
- aktiveringen kan ske på ett annat sätt än för vanliga utskov med luckor, vilket kan ge avbördningsystemet högre säkerhet genom redundans,
- aktiveringen kan vara automatisk,
- möjligheter till överdämning för dämpning begränsas,
- höjning av dammen kan behövas (om tillgänglig överdämningsförmåga är för liten),
- utflödet kan i många fall ske i annan dalgång än dammens,
- de största fördelarna är säkerheten (genom redundans) och de lägre kostnaderna.

I de fall utflödet sker i annan dalgång än dammens kan erosionsskador eller för höga nivåer i anläggningens omedelbara närhet undvikas eller blir deras effekt utan farliga konsekvenser för dammen.

4.1.1. Kompletterande utskov och reservutskov

I ett internationellt perspektiv har huvudorsaken till dammbrott (särskilt vid fyllningsdammar) varit för låg avbördningskapacitet eller felfunktion hos de befintliga utskoven. Ny utskovskapacitet vid befintliga dammar kan således ha två syften:

- kompletterande utskov,
- reservutskov.

Denna indelning avser syftet som utskoven kan tänkas tjäna. Vilken typ av utskov som väljs för dessa funktioner beror dels på allmänna principer som gäller oavsett vilken damm som studeras, dels på omständigheter som är specifika för den aktuella dammen. De allmängiltiga principerna som motiverar valet av ett utskov av typ fuse plug kommer att belysas nedan.

4.1.2. Säkerhetsaspekter

Fuseplugens sätt att aktiveras brukar vara enkelt och oberoende av det ordinarie utskovets öppningssystem. En kombination av fuseplug och utskov försett med vanliga luckor ökar säkerheten hos dammanläggningen eftersom risken att båda typerna av utskov slås ut blir mycket mindre. Överdämningar höjer risken för överströmning av tåtkärnan och kan också höja risken för vågöverspolning eller överströmning av dammen (om inte marginalen från början är tillräckligt stor eller en ombyggnad görs). Därför kan ett utskov som aktiveras av högt vattenstånd, till exempel fuseplug, rekommenderas i vissa fall.

4.1.3. Ekonomiska aspekter

Utskov av typ fuseplug brukar vara billigare än andra alternativ om de är avsedda att fungera med tillräckligt låg frekvens.

Den avbördningskapacitet som önskas vid en viss dammanläggning är beroende på faktorer som kan tänkas komma att ändras under dammens långa livstid (nya dämpningsåtgärder, nya hydrologiska metoder, vetenskapens utveckling, nya säkerhetskrav osv).

Samtidigt kan oförutsedda olycksscenarier tänkas inträffa och leda till behov att snabbt avbörda ett oväntat högt flöde. Det kan därför i vissa fall vara en fördel att utrusta dammen med extra avbördningskapacitet utöver den dimensionerande. Ett utskov av typ fuseplug kan vara lämplig från en sådan utgångspunkt eftersom en ökning av fuseplugens avbördningsförmåga ofta är billigare och enklare att utföra än när det gäller andra typer av utskov.

4.2. Förutsättningar för tillämpning av fuseplug

4.2.1. Specifik avbördning och bredd

För fuseplug-typer som HydroPlus, gummilucka, betongvägg som ska sprängas osv kan en betongtröskel sättas under avstängningssystemet. Denna tröskel kan relativt fritt utformas så att hög specifik avbördningen kan erhållas av samma storleksordning som vid vanliga utskov. För eroderbara dammdelar är däremot i de flesta fall den specifika avbördningen låg i jämförelse med vanliga utskov. Följaktligen erfordras stor bredd för denna typ av fuseplug. Tillgång till ett läge med tillräcklig bredd för att kunna avbörda det önskade flödet genom den eroderbara dammdelen blir därför en av de avgörande faktorerna vid val av eroderbar dammdel som utskov.

Om den större bredden hos utskovet bibehålls längs vattenvägen innebär detta större kontaktyta mellan vattnet och underliggande material och följaktligen större energiförluster. Detta kan vara fördelaktigt eftersom en mindre energiomvandlare då kommer att behövas eller ingen alls. Om vattenvägens bredd är mindre än den eroderbara dammdelens kommer sidoväggar att behövas för att styra vattnet från den breda till den smala sektionen samt för att innehålla vattensprånget. Samtidigt leder en mindre bredd hos vattenvägen till större vattendjup vid samma vattenföring. Följaktligen kommer högre sidoväggar att erfordras.

Vattenvägens och fuseplugens utformning avgörs från fall till fall genom teknisk/ekonomisk optimering i den mån avbördningskoefficienten och fallhöjden över den eroderbara dammdelens tröskel samt vattenvägens bredd kan varieras.

4.2.2. Läge, topografi och geologi

Fuseplugen, och detta gäller särskilt eroderbara dammdelar som brukar ha större längder, bör få plats antingen längs dammkrönet eller längs en spärrdamms krön. Om en lämplig sänka finns intill reservoarens strandlinje kan en fuseplug byggas där. Detta är kanske det bästa alternativet och har använts till exempel vid Mosuldammen. Möjligheter bör samtidigt finnas i sådana fall att enkelt och billigt leda frisläppt vatten vidare till en älvfåra. Även denna älvfåra bör vara tillräckligt bred för att allvarliga skador genom översvämningar inte skall uppstå eller dammkroppen skadas. Lutningen och geologin (helst erosionståligt material och stabila slänter) hos denna dalgång bör vara sådana att erosion genom höga vattenhastigheter undviks.

Risken för erosionsspridning i terrängen i anslutning till dammen eller dammkroppen bör vara liten och hanterbar. Placering av fuseplugen på berg utan behov av konstgjord tröskel och mot en berganslutning i sidled är det mest fördelaktiga.

4.2.3. Dammens uppbyggnad och kondition

Dammens uppbyggnad och kondition har betydelse för dess möjligheter att utrustas med utskov av typ fuseplug ur följande synpunkter:

4.2.3.1. Möjlighet till överdämning

Det måste vara möjligt att göra överdämning vid en damm som skall utrustas med utskov av fuseplug av typ som aktiveras utan teknisk åtgärd.

- *Erforderligt fribord* hos befintliga dammar bör noggrant beräknas enligt Flödeskommittens riktlinjer [26] innan man bedömer möjligheten till överdämning. Spärrdammarnas erforderliga fribord bör beräknas enligt samma regler som gäller för själva dammen om de inte avses att själva fungera som eroderbara dammdelar. Vid beräkningen av avbördningskapacitet genom befintliga utskov bör hänsyn tas till planerad överdämning medan vid beräkningen av tillgängligt fribord hänsyn bör tas till möjlig eller planerad förhöjning av dammen.
- *Den praktiskt möjliga* överdämningen bör noggrant undersökas eftersom den kan vara lägre än den teoretiska. Till exempel bör det faktiska läget för tät kärnans krön fastställas samt eventuella skador i tät kärnan över dämningens gräns sökas. Vid överdämning kan existerande läckage i dammen och grunden förvärras eller nya läckage uppstå.

Dammarnas förmåga att tåla överdämning utreds närmare i en rapport i denna serie [27]. Överdämning över tät kärnans nivå får accepteras endast om noggranna mätningar på plats visar att filterkriterierna mellan det grövre materialet i dammkrönet och sandfiltret är

uppfylla över hela dammlängden samt nivåerna hos tätkärnans krön och filtren är uppmätta på plats. Specifikt för en fuseplug är den låga användningsfrekvensen och de relativt korta avbördningsperioderna. Med hänsyn till detta erfordras lägre säkerhetsmarginaler i de fall när överdämning utförs för att aktivera en fuseplug [28]. Andra typer av fuseplug än eroderbara dammdelar bör användas för de dammar som inte har tillräckligt stort fribord eller där det inte kan uppnås genom rimliga åtgärder. Vissa av dessa typer av fuseplug kan i stället ha andra nackdelar. Till exempel aktiveras de inte automatiskt eller behöver uppvärmning vintertid (fuseplug med tippande luckor i stål eller betong).

Erosionsspridning till dammen och grunden gäller främst fuseplug av typ eroderbar dammdel och kan undvikas enligt de metoder som har redovisats i avsnitt 3.6.5.

4.2.4. Skador och konsekvenser vid aktivering

Det är, till skillnad från vanliga utskov, acceptabelt att en fuseplug orsakar skador i det nedströms belägna området vid aktivering. Det finns samtidigt risk att de skador en fuseplug orsakar nedströms vid aktivering blir större och ger andra typer av problem än skadorna nedströms vanliga utskov.

Risk för dödsfall eller annan personskada kan vara större nedströms om en fuseplug aktiveras utan teknisk åtgärd. Ett typiskt drag hos alla typer av fuseplug liksom hos utskov med fast tröskel utan avstängningsanordning är att de inte kan stängas samt att det avbördade flödet inte kan ändras eller påverkas efter aktivering. Specifikt för en fuseplug är att genom detta utskov redan från början avbördas ett stort flöde medan avbördningen hos ett vanlig utskov utan avstängningsanordning stiger långsammare från noll till det maximala värdet. Detta gör att inga naturliga varningssignaler som gradvist stigande flöde i älvfåran förekommer. Med hänsyn till att också vissa skador accepteras och användningsfrekvensen är mycket låg måste eventuella boende nedströms informeras och varningsprocedurer eller beredskapsplanering finnas.

Normalt bör placering av fuseplug uppströms om tätbebyggda områden eller där anläggningar av allmänt intresse finns undvikas. En alternativ lösning kan vara att vattenflödet leds förbi de särskilt känsliga områdena.

Miljöskador kan vara svåra att få accepterade i dalgångar som innan fuseplugen byggdes inte hade något vattendrag eller hade vattendrag som skulle haft låg vattenföring även under de höga flöden som kan medföra att fuseplugen aktiveras.

Ekonomiska förluster (egna eller tredje mans) kan vara svåra att få accepterade i dalgångar utan naturliga eller med små vattendrag. Det kan också vara svårt att få acceptans för ekonomiska förluster relaterade till användningsfrekvens och som därför är av osäker omfattning. Skadorna bör alltid ses i relation till de skador som det höga flödet ändå skulle ha förorsakat.

4.3. Kompletterande utskov

4.3.1. Allmänt

Om det dimensionerande flödet har höjts på grund av nya bestämmelser eller motsvarande (t ex Flödeskommitténs riktlinjer) så att en komplettering av avbördningskapaciteten behövs kallas det erfordrade nya utskovet för kompletterande utskov.

4.3.2. Befintlig avbördningskapacitet

Dammens utskov dimensioneras för att ha en viss avbördningskapacitet. I samband med anpassningen till Flödeskommitténs riktlinjer bör en översyn göras, vilket beskrivs i en rapport om verklig avbördningsförmåga i denna serie [29].

Planerade överdämningar kräver en uppskattning av den avbördning genom de befintliga utskoven som fås vid de nya nivåerna. De effekter som den nya större avbördningen ger på utskovsanordningarna, dammen och nedströmsfåran bör också undersökas.

4.3.3. Erfordrad avbördningskapacitet

Erfordrad avbördningskapacitet genom utskovet är kopplat till utsläpp från den ovanliggande dammen, lokal tillrinning, magasinets dämpningsmöjligheter och den samordnade regleringen längs älven. Tillrinningen beräknas i enlighet med Flödeskommitténs riktlinjer [26].

Verklig avbördningskapacitet kan påverkas i viss mån genom förändringar vid dammen som dammhöjning eller ändringar i förhållandena nedströms om utskovet (t ex lokal rensning av förträngningar i dalgången).

Behov av eventuell kompletterande avbördningskapacitet kan relativt enkelt fastställas som skillnaden mellan erfordrad avbördningskapacitet och befintlig avbördningskapacitet. I detta fall bör befintlig avbördningskapacitet vara väl känd och erfordrad avbördningskapacitet definierad, vilket vid svenska förhållanden normalt sker vid älvdimensionering.

4.3.4. Eroderbar dammdel som kompletterande utskov

Enligt internationell praxis rekommenderas användning av fuseplug för flöden med återkomsttid över 100 år ([13], [30], [31]). ("fuseplug ska inte projekteras för att träda i funktion för flöde med återkomsttid mindre än 100 år." [30]). Detta anses vara en rimligt låg återkomstfrekvens med hänsyn till ombyggnads- och reparationskostnader och konsekvenser nedströms. Beträffande nedströms belägna anläggningar som vägar, broar, dränerings-system osv, bör observeras att i normala fall och enligt internationell praxis accepteras skador eller partiellt utebliven funktion vid händelser med mer än 100 års återkomsttid.

Eftersom fuseplugen i de flesta fall aktiveras vid överskridande av ett visst vattenstånd i reservoaren oavsett orsaken, bör användningsfrekvensen bestämmas genom en kombinerad

riskbedömning för de faktorer som kan leda till stigande vattenyta (naturligt flöde, utebliven utskovsfunktion, hypotetiskt dammbrott vid en uppströms liggande dammanläggning osv).

Om olika typer av utskov från teknisk synpunkt är tillämpbara (jfr. avsnitt 4.2) bör en eroderbar dammdel väljas som kompletterande utskov framför andra alternativ i följande fall:

- den utgör det billigaste alternativet,
- en annan typ av aktivering (automatisk, sprängning, grävning) än den hos det befintliga utskovet anses som säkrare.

Vid val av typ av utskov för komplettering av avbördningskapaciteten spelar kostnaderna nästan alltid den viktigaste rollen. Den eroderbara dammdelens ”automatiska” aktivering är i sammanhanget av mindre vikt eftersom uppbyggnadstiden för höga flöden enligt Flödeskommitténs riktlinjer är relativt lång och vid större dammar ökningen av vattenståndet normalt bedöms ske ganska långsamt så att tillräcklig tid för åtgärder kan anses finnas.

4.4. Reservutskov

4.4.1. Allmänt

Om man av speciella skäl önskar reserv, t ex för att klara att ett ordinarie utskov inte öppnas som avsett, kallas detta för reservutskov. Flödeskommittén ställer kravet att utskov endast får medräknas om de är säkert tillgängliga med kort varsel. Där tillgängligheten inte bedöms tillräcklig kan ett alternativ till att förbättra den vara att använda reservutskov.

Vid vissa kombinationer av magasinstorlekar kan ett reservutskov också tänkas bidra till att dammen klarar ett dammbrott i en uppströms belägen dammanläggning. I detta fall kan den uppströms belägna dammen klassas ner till riskklass II-damm vad avser skador på nedströms belägen damm.

Reservutskov kan också tänkas användas för att snabbare kunna avsänka magasinet när en skada inträffat som motiverar en snabb avsänkning.

I ett älvsystem kan reservutskov även innebära ökade risker för dammar nedströms om den aktiveras av misstag.

4.4.2. Hypotetiska fall för reservutskov

I följande fall kan användning av reservutskov komma i fråga:

- *Verklig avbördningskapacitet är osäker eller tidigare överskattad.* Denna fråga har analyserats i rapporten om verklig avbördningskapacitet i denna serie [29]. Om förhållandena gör att osäkerheten om den verkliga kapaciteten är stor kan ett reservutskov vara ett alternativ och om det visar sig att kapaciteten är alltför låg kan ett kompletterande utskov behövas (se avsnitt 4.3).

Reservutskov kan även tänkas för att möjliggöra snabb avsänkning av magasinet. Teoretiskt kan detta vara av värde för att minska belastningen vid en läckagesituation och vid akut risk för dammbrott i ovanliggande damm.

- *Luckorna kan inte öppnas.* Oavsett vilket delsystem (det mekaniska, elektriska osv) som inte fungerar utgör detta en av de vanligaste orsakerna till att befintlig avbördningskapacitet inte kan utnyttjas helt. Frågan har studerats i rapport nr 7 i denna serie [32].
- *Blockering av utskovet eller utloppskanalen.* Storleken och formen på utskovets öppning och utloppskanal kan i vissa fall innebära stora risker för igensättning med flytande föremål t ex torv och träd [10] eller is. Mängden drivgods ökar under perioder med höga flöden. Den balk, som brukar finnas vid svenska dammar över luckan, skapar förutsättningar för att föremål kan fastna mellan balken och luckans övre kant och störa luckans manövrering. Risken för en farlig minskning av avbördningskapaciteten genom blockering är särskilt stor om dammens utskov är försett med enbart en eller få öppningar. Igensättningen av utskov med drivgods behandlas i rapport nr 6 i denna serie [33].

Utskovets öppning eller utloppskanalen kan också tänkas blockeras genom släntras om de ligger nära en naturlig slänt. Skred i nipor har behandlats i rapport nr 4 i denna serie [34].

Avbördning till en annan dalgång. Problem som kan uppstå nedströms om det befintliga utskovet kan undvikas genom ett reservutskov beläget i en annan dalgång eller om vattnet på annat sätt leds förbi den känsliga punkten. Rensning eller annan typ av breddning av dalgången kan, där den går att utföra, ge en varaktig minskning av vattenståndet och hastigheten. Däremot är vallar och förstärkningar av slänter ofta kostsamma lösningar.

4.5. Val av typ av utskov

4.5.1. Allmänt

4.5.1.1. Återkomsttider för funktion

Genom att analysera möjliga händelsekedjor i stället för enstaka händelse skapas bra förutsättningar att uppskatta risken samt återkomsttiderna för att ett eventuellt reservutskov skulle träda i kraft. Detta angreppssätt är lämpligt vid val av typ av utskov eftersom kostnaderna för t ex utskov av typ fuseplug är starkt beroende av återkomsttiderna för avbördning.

4.5.1.2. Aktiveringsmetod

Reservutskov som träder i funktion automatiskt rekommenderas för händelser som kan skada dammen.

4.5.1.3. *Aktiveringsnivå*

Val av reservutskov bör göras med hänsyn till att olika utskov förväntas uppfylla skilda krav för att kunna undvika konsekvenserna av olika olyckscenarier. Tex är kraven på aktiveringsnivå olika beroende på syftet med reservutskovet. I vissa fall bör reservutskoven verka så att magasinet inte stiger över dämmningsgränsen. I andra fall kan avsikten vara att snabbt kunna sänka magasinet under dämmningsgränsen.

4.5.1.4. *Säkerhetsstrategi*

Vanligtvis innebär automatisk aktivering att utskovsanordningen sätts i funktion vid för högt vattenstånd i magasinet. Begränsning av vattenståndet i magasinet till en viss nivå kan lätt säkerställas med ett sådant aktiveringssystem. Däremot kan inte de olyckscenarier som kräver sänkning av magasinet sättas i samband med ett visst vattenstånd som automatiskt aktiverar utskovet. Detta kräver därför beslutsfattande och tekniska åtgärder för att reservutskovet skall träda i funktion.

4.5.2. *Utskov aktiverat automatiskt av vattenståndet*

Denna typ av utskov täcker enbart behovet av extra avbördningskapacitet vid de händelsekedjor som leder till en höjning av vattenståndet i magasinet över den accepterade nivån. Utskov som hör till denna typ är följande:

- utskov med fast tröskel (bräddavlopp),
- utskov med förstörbar avstängning (fuseplug) och med tröskeln vid lämplig nivå (vid eller över dämmningsgränsen),
 - eroderbar dammdel,
 - gummidamm,
 - typ "HydroPlus",
 - avstängning avsedd att sprängas (betongvägg),
- hävert;
- schaktutskov ("morning glory");
- utskov försett med lucka med automatiskt styrsystem aktiverat av vattenståndet.

Utskov av hävert-typ och schaktutskov är vanligtvis komplicerade tekniskt eller omöjligt att bygga vid befintliga dammar och kan därför bli en för dyr lösning. Båda kan också relativt lätt bli igensatta. Beträffande hävertutskov se KTHs rapport [35].

4.5.2.1. *Eroderbar dammdel aktiverad av högt vattenstånd*

En fast tröskel utan lucka kan inte användas om överdämning planeras och en sänkning av den aktuella dämmningsgränsen önskas undvikas. Däremot kan utskov med lucka eller avstängning som förstörs (på ett annat sätt än genom sprängning) vid en viss vattennivå i magasinet möjliggöra överdämning och samtidigt aktiveras automatiskt. Aktiverings-systemet är i det sista fallet oberoende av tekniska fel som vid vanliga luckor. Detta utskov brukar också vara billigare än utskov som stängs med luckor om förhållandena vid dammen

är lämpliga för placering av utskov med förstörbar avstängning. Den billigaste typen av utskov med förstörbar avstängning är vanligtvis den eroderbara dammdelen. Av denna typ av utskov kan en homogen eroderbar dammdel utan tätskikt användas enbart om vattenytan önskas behållas vid eller nära dämningssgränsen efter det att den eroderbara dammdelen har fungerat (se också avsnitt 3.6.4).

Eroderbar dammdel aktiverad av högt vattenstånd är den lämpligaste som reservutskov i situationer när förhållandena är lämpliga för byggande av ett sådant utskov (kostnaderna är mindre eller lika med kostnaderna för andra typer av utskov) och risk finns för händelsekedjor som gör att vattenytan stiger snabbt och oväntat eller om överdämning planeras vid dammen.

För att uppnå viss redundans bör flera aktiveringssystem tillämpas, t ex eroderbara dammdelar aktiverade av vattenståndet i magasinet kan också tänkas startas genom teknisk åtgärd enligt följande avsnitt.

4.5.3. Utskov aktiverat genom teknisk åtgärd

Utskov aktiverat genom teknisk åtgärd är enda möjligheten att nå en snabb sänkning av vattenståndet i magasinet i de fall där detta önskas utan stigande vattenyta i magasinet (brott i en damm uppströms, tilltagande läckage, risk för ras i slänterna osv). Man kan säga att i detta fall fungerar reservutskovet som ett utskov med tröskeln under dämningssgränsen och försett med lucka.

Utskov aktiverade genom teknisk åtgärd är utskov som har någon form av manuellt påverkbart avstängningssystem. Sådana utskov är följande:

- tunnelutskov,
- utskov med lucka,
- utskov med förstörbar avstängning (fuseplug) med tröskeln på lämplig nivå under dämningssgränsen,
 - eroderbar dammdel aktiverad genom teknisk åtgärd,
 - enkelt avstängningssystem (t ex betongvägg) förstörbart genom sprängning.

Utskov med förstörbar avstängning utgör ett enkelt system och kan därför vara det bästa alternativet när möjligheten till snabb avsänkning önskas. Med stor sannolikhet är det också det billigaste alternativet. Vilken av de två varianterna som är lämpligast avgörs av tekniska och ekonomiska skäl.

4.5.3.1. *Eroderbar dammdel aktiverad genom teknisk åtgärd*

Aktivering av en eroderbar dammdel genom teknisk åtgärd innebär vanligtvis att en grävmaskin schaktar en kanal tvärs över krönet från nedströmsslänten till vattenytan. Under svåra väderförhållanden eller vid uppenbar risk för ras kan tillgängligheten till den eroderbara dammdelen vara dålig och schaktningsarbetet farligt. I de flesta fall kan därför ett utskov med avstängning som kan förstöras från långt avstånd genom sprängning vara enklare och säkrare under de svåra väderförhållanden och brist på tid som man måste räkna med kan råda i samband med de extrema flödena.

Eroderbara dammdelar som aktiveras genom teknisk åtgärd är de mest lämpliga som reservutskov för de fall när:

- möjlighet till snabb sänkning av vattenytan i magasinet under dämningsskärn gränsen önskas,
- tillgängligheten till den eroderbara dammdelen är bra även under svåra förhållanden (översvämningar, vågor, storm),
- lämpliga förhållanden för byggande av respektive typ av eroderbar dammdel gör att kostnaderna är mindre eller lika med kostnaderna för andra typer av utskov (t ex tunnel, ytutskov med lucka).

I de fall när utskovets tröskel bör ligga lägre än dämningsskärn gränsen är en homogen eroderbar dammdel utan tätskikt inte lämplig. Tätskikt av gummiduk bör övervägas grundligt innan den rekommenderas för högre eroderbara dammdelar eftersom den sällan är använd i praktiken för större dammar.

4.6. Ekonomiska aspekter

4.6.1. Allmänt

I kostnadsberäkningen för en fuseplug bör hänsyn tas till de olika funktionskrav som kommer att finnas under dess livstid samt till alla delar som ingår i en utskovsanordning:

- bygg-, underhålls-, återuppbyggnads- och reparations- samt kapitalkostnader för:
 - utskov och lucka
 - de nedströms liggande anordningarna som hör till fuseplugen:
 - kanal för bortledning av avbördat flöde
 - energiomvandlare
 - erosionsskydd
 - andra skyddsåtgärder (skyddsväggar, lokalt utvidgande av älvfåran)
 - anslutningskonstruktioner mot dammkropp eller naturliga slänter
 - andra anordningar tillhörande dammanläggningen
 - andra nedströms liggande objekt (bebyggelse, trafikleder, andra anläggningar), som kan skadas vid utflöde
 - miljöpåverkan
- eventuella förluster i energiproduktion under bygg- och driftperiod:
 - mindre energiproduktion ifall dämningsskärn gränsen behöver sänkas för att kunna använda ett utskov av typ fuseplug (normalt inte aktuellt)
 - eventuellt bortfall av energiproduktion under byggnads- och återuppbyggnadsperioden
 - eventuella förluster på grund av förtappningar

Kostnadsberäkningarna för ett utskov av fuseplug-typ bör inkludera nuvärdet av alla kostnader över en tillräckligt lång tidsperiod för att omfatta fuseplugens aktivering. Därtill bör oavsiktlig aktivering beaktas.

Ombyggnadsmomenten gäller både avsiktlig och oavsiktlig aktivering. Avsiktlig aktivering kan ske t ex i samband med de dimensionerade flödena som har, beroende på dammens klass, en återkomsttid på 100 till 10 000 år.

Nuvärdet av kostnader långt bort i tiden blir ofta försumbara.

4.6.2. Jämförelse mellan fuseplug och alternativa lösningar

En jämförelse skulle i princip kunna göras mellan utskov av fuseplug-typ och alla andra möjliga typer av utskov. I praktiken utesluts många utskovstyper av tekniska skäl (t ex tunnelutskov) så vanligtvis gäller en relevant jämförelsen bara ett fåtal alternativ. I allmänhet och vid svenska förhållanden i synnerhet gäller den mest intressanta jämförelsen utskov av fuseplug-typ och utskov bestående av fast tröskel i betong, med eller utan lucka.

4.6.2.1. *Kostnad för fuseplug jämfört med ytutskov med fast tröskel i betong*

Byggekostnaderna för själva utskovet är lägre för en fuseplug än för andra typer av utskov med lucka främst beroende på att avstängningsanordningen är enklare och billigare. Samtidigt är vinsterna för energiproduktion nästan lika stora vid fuseplug som vid utskov med lucka och givetvist större än för fast tröskel. Detta beror på att vatten oftare spills vid en fast tröskel även under normala flöden. Legala aspekter som läget för dämningssgränsen och minimitappning beaktas.

Bygg- och reparationskostnaderna för vattenvägen, energiomvandlaren och eventuella skyddsåtgärder mot de skador orsakade av översvämningar på dammen och kanalen nedströms brukar utgöra en större del av utskovets totala kostnad. De tekniska lösningarna för fuseplugens vattenväg och läge kan väljas på ett sätt som minskar denna kostnad i jämförelse med motsvarande kostnader för vanliga utskov. Breda och glest befolkade dalgångar, erosionståligh grund nedströms om dammen, möjlighet att placera fuseplugen i en sänka i terrängen eller på en lägre spärrdamm ger billigare erosionsskydd.

De hydrologiska förutsättningarna och de samordnade drifrutinerna i ett älvsystem anses gynnsamma för användning av en fuseplug om de ger längre återkomsttid för de flöden som avses att avbördas genom fuseplugen. Om utsläppet också sker under kortare perioder hinner skadlig erosion utanför fuseplugen inte utvecklas fullständigt.

De specifika underhållskostnaderna för åtgärder avsedda att bibehålla fuseplugens och särskilt den eroderbara dammdelens förmåga att förstöras vid rätt tillfälle är relativt svårt att uppskatta främst beroende på avsaknad av rutiner och erfarenhet. Mer forskning och utveckling behövs inom detta område. Ändå bedöms att underhållskostnaderna för utskov försedda med luckor (inklusive manövrerings- och varningssystem) kan vara större än för en fuseplug medan de för fast tröskel bör vara mindre.

4.6.2.2. *Kostnader för fuseplug jämfört med hävertutskov*

En intressant jämförelse kan göras mellan fuseplug och hävertutskov. Båda brukar träda i funktion automatiskt och fungera vid låga överfallshöjder. Däremot avbördar hävertutskovet mycket högre vattenföring per breddenhet än en fuseplug och kan därför behöva kostsamma erosionsskydd och ibland energiomvandlare nedströms. Hävertutskovets känslighet för igensättning med is och andra flytande föremål leder till både en mindre säker funktion och höga kostnader för underhåll. Dess komplicerade utformning höjer byggkostnaderna.

5. SLUTSATSER

5.1. Fördelar och nackdelar

Konsekvenserna av att använda en fuseplug som utskov kan teoretiskt grupperas i fördelar och nackdelar i jämförelse med vanliga utskov.

5.1.1. Fördelar

- lägre byggnadskostnader,
- aktivering och funktion under avbördningsskedet utan elektriska eller mekaniska system och i de flesta fall automatiskt,
- samma vattenmängd i reservoaren som för ett utskov med lucka och större än vid användning av ett utskov med fast tröskel utan lucka,
- en ekologiskt mer anpassad lösning, i vissa fall (bilaga A).

5.1.2. Nackdelar

- återställnings- och reparationsåtgärder efter varje användningstillfälle,
- få eller inga standardiserade lösningar finns,
- i vissa fall risk för skador nedströms,
- en fuseplug kan inte stängas eller regleras efter aktivering,
- snabb ökning av flödet nedströms,
- osäkerhet beträffande framtida kostnader för återuppbyggnad (kan ju teoretiskt behövas redan efter ett år), som beror på hydrologiska aspekter, incidenter hos dammens övriga avbördningsanordningar och i vissa fall bedömningen av brottrisen för uppströms liggande dammar,
- tillfredsställande teoretisk och speciellt praktisk erfarenhet om fuseplug saknas

Utskov av typ fuseplug har sällan byggts. De som finns har trätt i funktion enbart i enstaka fall (1984, Mnjoli damm, Swaziland och vid modellförsök i skala 1:2, Oxbow, USA, 1959). Således saknas tillfredsställande teoretisk och speciellt praktisk erfarenhet vilket innebär att tekniska problem kan tänkas uppstå. Identifiering och förståelse för de fysikaliska processerna som styr fuseplugens funktion kan leda till bättre tekniska lösningar så att dessa problem undviks eller minimeras.

5.1.2.1. Vissa speciella nackdelar

Följande beror på otillräckliga kunskaper om fuseplugens funktion (punkt 1 och 2), särskilt hos eroderbara dammdelar (alla punkterna). Dessa problem kan i framtiden sannolikt undanröjas eller reduceras:

- större risk för oavsiktlig eller misslyckad aktivering,
- risk för överströmning av dammens tåtkärna,
- flödets tidsberoende utveckling, särskilt under perioden för aktivering och erosion av fuseplugen, kan inte i förväg beskrivas exakt på grund av osäkerhet om förloppet,

- åldringsprocesser i en eroderbar dammdel kan påverka dess funktion negativt,
- erfarenhet saknas av funktionen hos eroderbara dammdelar i samband med tjälning eller uttorkning av tåtkärnan,
- negativa psykologiska effekter.

Det finns viss osäkerhet beträffande fuseplugens exakta avbördningskapacitet. Detta orsakas av svårigheter i att med stor precision beräkna avbördningskapaciteten hos en bred tröskel som ofta finns under en fuseplugs förstörbara del. För fuseplug av typ eroderbar dammdel finns det också en osäkerhet beträffande storleken hos den resulterande öppningen efter erosionsprocessens slut. Mindre avbördningskapacitet än planerat kan leda till höjning av vattenytan i reservoaren och risk för överströmning av dammens tåtkärna.

5.1.2.2. Negativ psykologisk effekt

Då fuseplugen aktiveras som planerat kan detta ge det felaktiga intrycket att det rör sig om dammbrott eller annan olyckshändelse vid dammen. Detta kan leda till oro och negativ inställning. Det är därför viktigt att befolkningen noggrant informeras om denna typ av utskov, också om dess positiva effekter på dammens säkerhet. Det område nedströms om en fuseplug som kommer att överströmmas under avbördningen bör skyltas tydligt.

De här redovisade för- och nackdelarna ger en indikation på de problem som är specifika för en fuseplug. De kan vara "inbyggda" i själva fuseplugens princip eller kan uppstå på grund av funktionsfel. Vissa av dem kan undanröjas eller sannolikheten att de inträffar kan minskas genom studier av de fenomen som är kopplade till funktionen hos en fuseplug. Slutligen kan dessa studier leda till riktlinjer för optimal praktisk tillämpning samt belysa behovet av fortsatt forskning kring denna typ av utskov.

5.2. Förutsättningar i Sverige

5.2.1. Konsekvenser nedströms

Konsekvenser nedströms om en fuseplug orsakade av det utsläppta flödet kommer i de flesta fall att ge mindre problem i svenska vattendrag än i andra länder. Några tänkbara orsaker kan nämnas:

- mindre flöde behöver avbördas genom fuseplugen vid svenska dammar än vid de utskov av typ fuseplug som hittills har byggts i världen,
- mindre risk för erosion i den omkringliggande naturliga terrängen på grund av erosions-tåligt berg och breda dalgångar för större delen av landet,
- ofta mindre tätbebyggda dalgångar.

Svårigheter kan uppstå för att få tillstånd att planera för att avbörda i dalgångar som inte är älvmålar eller som eljest skulle avbörda endast mindre vattenförlor.

Noggranna beräkningar bör utföras för att få kartor med flödesutbredningen nedströms om fuseplugen. Värdena härifrån för vattenstånd och vattenhastigheter bör användas för att uppskatta erosionspotential och områden som kan påverkas.

5.2.2. Tjäle

Det svenska klimatet gör att tjäle lätt bildas inom dammfyllningar och varar där över längre perioder än vid de flesta andra anläggningar i världen. Därför finns det behov att närmare studera hur djupt in i fyllningen tjälen når, hur lång tid den varar och hur mycket den påverkar möjligheten till erosion och bortspolning i samband med den eroderbara dammdelens funktion. Risker är att tjälen varar inom fyllningen långt in i våren och finns kvar under vårflödena, som är en period då sannolikheten för att den eroderbara dammdelen skulle behöva träda i funktion, ökar betydligt.

Tjälens inflytande på erosionsprocessen kan bli en nyckelfråga vid val av utskov av typ eroderbar dammdel.

Effekten av eventuella åtgärder mot tjälbildning inom den eroderbara dammdelens fyllning behöver också studeras. Hittills har inom dammtekniken enbart tät kärnans skydd studerats.

5.3. Dammsäkerhetsaspekter

5.3.1. Riskbedömningsaspekter

De problem som kan kallas för problem av riskbedömningskaraktär avser svårigheterna i beräkningen av frekvensen med vilken vattenytan når den nivå som aktiverar fuseplugen. En större frekvens i användningen än ursprungligt bedömd äventyrar inte dammens säkerhet och innebär inte fara för människoliv men resulterar naturligtvis i större kostnader än beräknat, om användningen sker betydligt oftare än 100 år.

Eftersom kostnaderna för en fuseplug ökar endast lite med ökande avbördningskapacitet i jämförelse med kostnadsökningen för vanliga utskov kan en fuseplug byggas med extra säkerhetsmarginal. På detta sätt kan en damm utrustad med fuseplug vara bättre skyddad mot ett större flöde än det teoretiskt beräknade. Vid dimensionering av en hel älv är det dock viktigt att avbördningen vid respektive damm är känd och inte blir högre än förutsatt.

5.3.2. Säkerhetsaspekter

Fuseplugens sätt att aktiveras brukar vara enkelt och oberoende av de övriga luckornas öppningssystem, dvs systemet får en inbyggd redundans. Samtidigt kan hos en fuseplug (främst av typ eroderbar dammdel och "HydroPlus") både automatisk och åtgärdsberoende aktivering användas.

Nackdelen med en fuseplug ur säkerhetssynpunkt, särskilt när det gäller eroderbara dammdelar, är osäkerheten beträffande aktiveringsmekanismen. Detta är dock inte ett oöverstigligt hinder utan beror på för lite kunskap om denna typ av utskov och kan lösas genom mer studier och experimentell verksamhet.

5.4. Standardisering

5.4.1. Behovet och typen av fuseplug

Om och vilken typ av fuseplug som behöver byggas kan bedömas enbart med hänsyn till de konkreta förhållanden vid den givna anläggningen. Därför ges här endast allmänna rekommendationer och prioriteringar. När en fuseplug byggs i en befintlig damm blir situationen ännu mer komplicerad. Om däremot dammen planeras undergå ombyggnadsarbete kan den lättare anpassas för en fuseplug-konstruktion.

5.4.2. Utformning

Utformningen av de flesta typer av fuseplug kan med undantag för eroderbara dammdelar standardiseras. Det är däremot inte möjligt att "standardisera" en eroderbar dammdel i samma grad som ett betongutskov och tillämpa rutinmässiga beräkningar.

Om det ändå i vissa fall är möjligt att rent tekniskt tillämpa en "standardiserad" eroderbar dammdel är det inte självklart att denna lösning också kommer att vara den bästa ur teknisk/ekonomisk synpunkt. Om detta accepteras bör, i synnerhet vid nya dammar, eroderbara dammdelar utföras med de materialsammansättningar och dimensioner som redan har prövats i prototypskala, som till exempel vid Oxbowdammen. För eventuella eroderbara dammdelar vid befintliga svenska dammar bör nya utformningar helst testas i modellförsök.

6. REFERENSER

- [1] Michaela Dan, *Seitevare dammen - eroderbar dammdel, kalkylexempel*. Koncept till teknisk rapport, Vattenfall, Stockholm, Sverige, 1995.
- [2] Michaela Dan, *Eroderbar dammdel - beräkningsmetodik och utformning*. Underlag till teknisk rapport, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, Sverige, 1996.
- [3] Redaktionen, *Saving in store*, Construction Today, September, 1992.
- [4] Fuat Senturk, *Un nouveau type de déversoir: le déversoir fusible*, IX-th Congress ICOLD, vol. Q.33, R.25, 1967, Istanbul, (på franska).
- [5] E. Roy Tinney, H. Y. Hsu, *Mechanics of Washout of an Erodible Fuse Plug*, ASCE of the Hydraulics Division, Transactions, vol. 127, 1, 1962.
- [6] Y. P. Pravdivets, M. E. Bramley, *Stepped protection blocks for dam spillways*, Water Power & Dam Construction, July, 1989.
- [7] Y. P. Pravdivets, S. M. Slissky, *Passing Floodwaters over Embankment dams*, Water Power & Dam Construction, July, 1989.
- [8] G. R. Powledge, David C. Ralston, Paul Miller, Yung Hai Chen, Paul Clopper, D. M. Temple, *Mechanics of overflow erosion on embankments I: Research activities*, ASCE Journal of the Hydraulics Division, vol. 115/8, August, 1989.
- [9] G. R. Powledge, David C. Ralston, Paul Miller, Yung Hai Chen, Paul Clopper, D. M. Temple, *Mechanics of overflow erosion on embankments II: Hydraulics and design considerations*, ASCE Journal of the Hydraulics Division, vol. 115/8, August, 1989.
- [10] Klemet Godtland, *Tilstopping flomlop - samlerapport*, Teknisk rapport - STF60 F91119, SINTEF Norsk hydroteknisk laboratorium, Trondheim, Norway, december, 1991 (på norska).
- [11] A. Clifford Pugh, *Hydraulic model studies of fuse plug embankments*, Report REC-ERC-85-7, USBR Engineering and Research Center, Denver Colorado, USA, December, 1985.
- [12] Bobby P. Fletcher, Paul A. Gilbert, *Center Hill fuse plug spillway Caney Fork River Tennessee. Hydraulic Model Investigation*, Report HL-92-15, USACE Waterways Experiment Station Hydraulics and Geotechnical Laboratory, Vicksburg, Mississippi, USA, December, 1992.
- [13] E. T. Engels, A. Sherman-Chase, *Design and operation of a fuse plug spillway in Swaziland*, Water Power & Dam Construction, June, 1985.
- [14] Åke Nilsson, Per Vallander, *Fyllningsdammarnas förmåga att tåla överspolande vågor*, VASO rapport 12, ELFORSK, Sverige, 1995.

- [15] A. Wörman, M. Skoglund, *Overtopping of core in rockfill dams - internal erosion*, Proceedings of the 2nd International Conference on Hydropower, June, 16–18, 1992, Balkema, Rotterdam; Brookfield, Lillehammer, Norway.
- [16] A. Wörman, Ragnheidur Olafsdottir, *Erosion in a granular medium interface*, Journal of Hydraulic Research, vol. 30, nr 5, 1992.
- [17] Øivind Solvik and Morten Skoglund, *Stenfyllingsdammers risiko for indre erosjon og beregning av turbulent permeabilitetskoeffisient*, Teknisk rapport - STF60 A91089, SINTEF Norsk hydroteknisk laboratorium, Trondheim, Norway, december, 1991 (på norska).
- [18] R. A. Dodge, *Overtopping flow on low embankment dams - Summary report of model tests*, Report REC-ERC-88-3, USBR Engineering and Research Center, Denver, Colorado, USA, December, 1988.
- [19] A. Zagars, J. M. Hagood, Jr., *Bath County, a 2 100 MW development in the USA*, Water Power & Dam Construction, October, 1977.
- [20] C. B. Rodriguez, *L'aménagement des eaux dans le projet et la construction du barrage de compensation du Chocon à Arroyito*, XIII-th Congress ICOLD, vol. Q.50, R.42, 1979, New Delhi, (på franska).
- [21] H. E. Minor, R. Schmidiger, *Selection of Spillway Type Giving Special Attention to Safety Aspects*, XVI-th Congress ICOLD, vol. Q.63, R.20, 1988, San Francisco.
- [22] Karl Terzaghi, B. Ralph Peck, *Soil Mechanics in Engineerings Practice*, John Wiley & Sons, 1948, New York.
- [23] Vattenfall, *Jord och stenfyllningsdammar*, Happy Printing AB, 1988, Sverige.
- [24] M. Altinakar, J. Bruschin, *Mosul dam project - Fuse plug spillway, Hydraulic models*, Report no. LHYDREP-320, Swiss Institut of Technology, Civ. Eng. Dept. Lausanne, Schweiz, November, 1980.
- [25] Woon-Hyung Kim, David E. Daniel, *Effects of freezing on hydraulic conductivity of compacted clay*, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, vol.118/7, July 1992.
- [26] *Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar*, Flödeskommittén, Statens Vattenfallsverk, Svenska Kraftverksföreningen och Svenska Meteorologiska och Hydrologiska Institut, slutrapport, Stockholm och Norrköping, 1990.
- [27] Åke Nilsson, *Fyllningsdammarernas förmåga att tåla överdämning*, VASO dammkommitté rapport nr 15, 1995.
- [28] Urban Norstedt, *Överdämningsmöjligheter - inventering ur dammsäkerhets-synpunkt*, Intern rapport, Vattenfall, Sverige, 1989.

[29] Karl Rytters, Nils Johansson, *Verklig avbördningskapacitet*, VASO dammkommitté rapport nr 5, 1995.

[30] *Guidelines for using fuse plugs embankments in auxiliary spillways*, USBR-Assistent Commissioner - Engineering and Research Center, ACER Technical memorandum no. 10, 1987, Denver, Colorado, USA.

[31] J. Köngeter, *Erodible Dams as Fuse Plug Spillway. Guacerique Dam (Honduras) and Koudiat Affren Dam (Algeria) Are Demonstrated as Examples*, XVI-th Congress ICOLD, vol. Q.63, R.89, 1988, San Francisco.

[32] Stefan Lagerholm, *Utskovsluckors funktionssäkerhet*, VASO dammkommitté rapport nr 7, 1995.

[33] Nils Johansson, *Drivgods vid dammar*, VASO dammkommitté rapport nr 6, 1995.

[34] Rolf Christiansson, Erik Arnér, *Skred i nipor*, VASO dammkommitté rapport nr 4, 1995.

[35] Hans Bergh, *Hävertutskov för fyllningsdammar*, KTH - rapport no. 39, Kungliga Tekniska Högskolan, Inst. för vattenbyggnad, Sverige, 1988.

[36] Chen Y. H. and Anderson B. A., *Development of a methodology for estimating embankment damage due to flow overtopping*, SLA Project DC-FHA-01, Final report no. DTFH61-82-C-00104, Federal Highway Administration and Forest, ServiceSimons Li & Assocs. Inc., 1986.

[37] J. Knauss, *Computation of Maximum Discharge Flow at Overflow Rockfill Dams*, XIII-th Congress ICOLD, vol. Q.50, R.9, 1979, New Delhi.

[38] Helmut Scheuerlein, *Design of Overflow Rockfill Dams*, V-th Congress IAHR, vol. 1, A-56, 1973, Istanbul.

[39] Henry Olivier, *Some aspects of major river diversion during construction*, XI-th Congress ICOLD, vol. Q.41, R.63, 1973, Madrid.

[40] N. Shand, P. J. N. Pells, *Experience in The Design and Construction of Reinforced Rockfill Dams*, X-th Congress ICOLD, vol. Q.36, R.19, 1970, Montreal.

[41] F. M. Lear, N. J. Butler, *Surface Diversion of Stream Flows During Construction of Dams in Queensland*, IX-th Congress ICOLD, vol. Q.33, R.49, 1967, Istanbul.

[42] G.R. Powledge, R.A. Dodge, *Overtopping of Small Dams - An Alternative for Dam Safety*, I {ASCE} Hydraulics Division Speciality Conf.: "Hydraulics and Hydrology in the Small Computer Age", vol. 2, 1985, Orlando, Florida.

[43] H. W. M. Hewlet, L. A. Boorman, M. E. Bramley, *Guide to the design of reinforced grass waterways*, CIRIA Report no. 116, Great Britain's Construction Industry Research and Information Association, London, U. K., 1987.

[44] *Embankments dams - Ch. 19 Geotextiles*, USBR-Assistent Commissioner - Engineering and Research Center, Design standards no. 13, September, 1992, Denver, Colorado, USA.

[45] R. Corda, *Watertight geomembranes for dams - State of the art*, ICOLD Bulletin 78, Paris, France, 1991.

[46] R. A. Dodge, *Emergency spillways using geomembranes - field study*, Report REC-ERC-88-1, USBR Engineering and Research Center, Denver, Colorado, USA, April 1988.

7. BILAGOR

Bilaga A. Erosionsskydd

Bilaga B. Geomembraner

Bilaga C. Vågskydd

Bilaga D. Snedställning

A. Erosionsskydd

A.1. Allmänt

Beroende på använt material samt utformning och placering kan erosionsskydd indelas i fyra kategorier:

- betongskydd (hel/kontinuerlig beklädnad med betong),
- erosionsskydd av lösa element,
- erosionsskydd av sammanhängande element,
- gräs och geosyntetiska skydd i kombination med gräs.

Andra frågor i samband med användningen av olika typer erosionsskydd, som åtgärder mot erosion under skyddet, miljöaspekter, kommer också att diskuteras i denna bilaga.

A.2. Erosionsskydd av betong

Konventionella erosionsskydd av betong har sannolikt den största erosionsbeständigheten, men flera nackdelar gör att de rekommenderas för användning enbart när andra metoder inte kan tillämpas, och främst för höga vattenhastigheter (respektive specifik avbördning) eventuellt med storskaliga tryckvariationer (vattensprång).

Fördel är:

- hög erosionsbeständighet.

Nackdelar är:

- stora kostnader,
- små friktionsförluster med försumbar reduktion av vattenhastigheterna,
- kan inte placeras på terräng som lätt deformeras,
- anlagda på lutande grund har de tendens att glida på underliggande filter,
- måste förses med dräneringshål mot hydrauliskt upptryck, som lätt kan sättas ur funktion genom att fyllas med sediment.

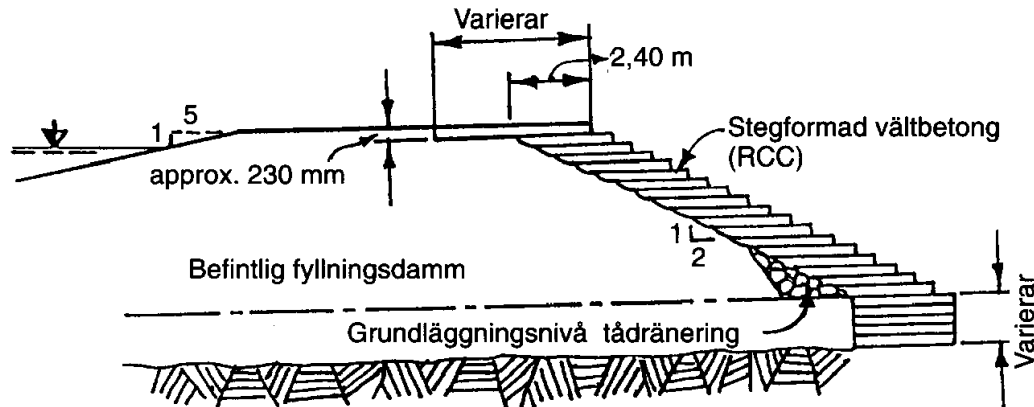
Betongplatta med eller utan armering

Betongplatta med eller utan armering har ovanstående för- och nackdelar.

Stegformad vältbetong

Stegformad vältbetong ("Roller-compacted concrete – RCC") (se figur 12) är en typ av erosionsskydd som eliminerar några av betongskyddets nackdelar men bevarar fördelarna. Dess egenskaper motsvarar det oarmerade betongskyddets men till lägre kostnader samt enklare och snabbare utförande (gjutning).

Förlängt ytskydd uppströms den bestämmande sektionen



Figur 12. Erosionsskydd med vältbetong – RCC.

En viktig positiv egenskap hos skydd av denna typ är dess stegutformning som bidrar till en stor energiförlust med medföljande sänkning av vattenhastigheterna vid långa, branta slänter. Denna fördel gör att detta skydd rekommenderas som erosionsskydd vid överströmning av dammar eller i starkt lutande utskov och vattenvägar. En nackdel i jämförelse med betongplattor är att beständigheten och frosttåligheten hos det erhållna skyddet kommer att vara lägre än för konstruktionen av vanlig betong. Ändå kan detta vara försumbart med hänsyn till dess större tjocklek och den låga frekvensen i användningen.

En beklädnad av den fasta trösklen under fuseplugen och av dammslänten nedanför med stegformad vältbetong kan vara ett alternativ om en stor specifik avbördning skulle erhållas eller fuseplugen ligger ovanpå ett relativt högt dammparti. Med stor specifik avbördning menas här den som brukar förekomma vid vanliga betongutskov.

Cementstabiliserad jord

Erosionsskydd av cementstabiliserad jord ("soil cement"¹⁾[36] – en blandning av Portlandcement och jord) kan utformas och placeras på liknande sätt som vältbetongen och har givit nästa lika bra resultat. Fördelen är att materialet innehåller mindre cementmängd och därför blir billigare.

A.3 Erosionssydd av lösa element

Erosionssydd av lösa element kan vara:

- utvalda sprängstenar ("riprap"),
- betongblock.

¹⁾ "Soil cement is created when Portland cement is mixed with locally available soils and then placed, spread and compacted with earth-moving equipment" [8]. "A zero-slump mixture of soil, sand and 11% cement, by dry weight, placed and mechanically compacted parallel to the slope" [36].

Den främsta fördelen hos erosionsskydd av lösa element är att de är lättare att framställa och utplacera och därför billigare. Lösa stenar eller betongblock är instabila vid storskaliga tryckvariationer som de som uppstår vid uppkomst av vattensprång och därför bör de inte användas i energiomvandlare av bassängtyp eller längs den eroderbara dammdelens begränsningsytor. De kan också vara lätt skadade av naturliga omständigheter (djur, växter) eller vandalism och därför krävs periodisk inspektion.

Riprap

Det enklaste erosionsskyddet är den så kallade riprap, dumpad eller ordnad sprängsten utvalda med utgångspunkt från filterkriterier och kritisk hastighet. Möjligheten att använda det är särskilt beroende på tillgängligheten av erforderlig mängd stenar i rätt storlek. Denna lösning är ganska begränsad i användningen eftersom vid stora vattenhastigheter blir tillräckligt stora block både svårt att skaffa och dyrt att transportera.

Vid strömning med litet djup över storskalig råhet (åstadkommen av sprängstenarna) med betydande luftblandning (till exempel vid användning för släntskydd för dammen under fuseplugen eller för överkritisk strömning längs vattenvägen med stora vattenhastigheter), kan de vanliga strömningsekvationerna inte tillämpas. I stället bör andra metoder för beräkningen användas ([37], [38], [39]).

Lösa betongblock utformade för att låsas ihop

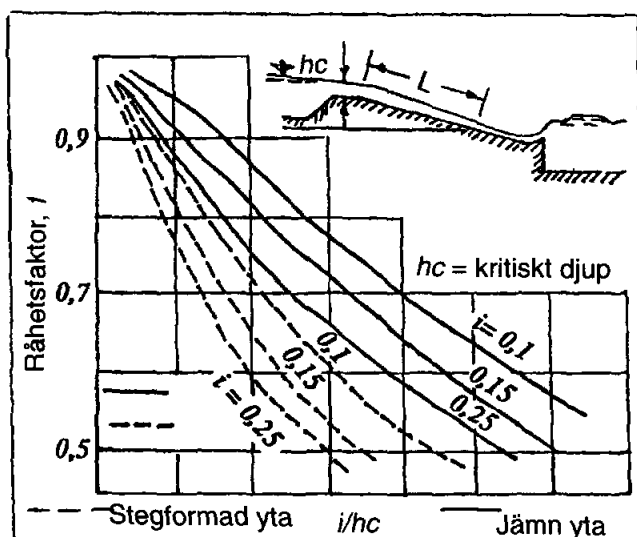
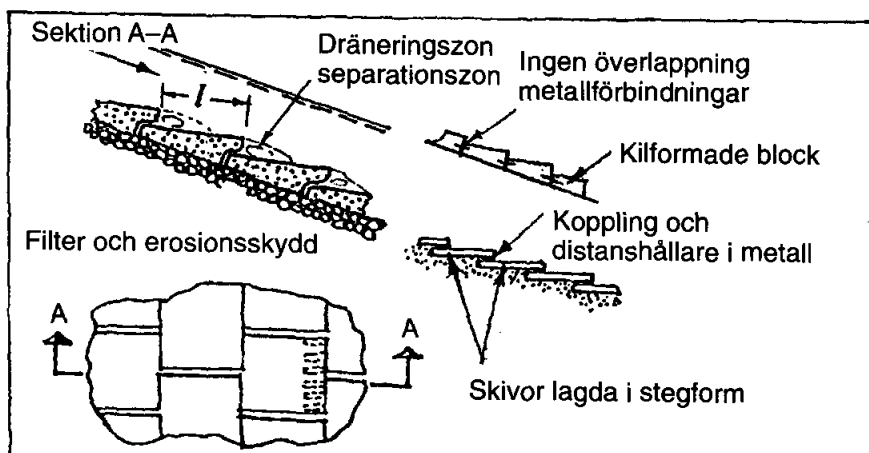
För lägre hastigheter kan i stället lösa betongblock utformade för att låsas ihop användas. Parametrarna beträffande deras erosionsmotstånd kommer främst från försök och tillämpningar för vågbrytare. Detta kan betraktas som en nackdel och mer specifika tester skulle behövas innan de används.

Prefabricerade betongelement ordnade i stegform

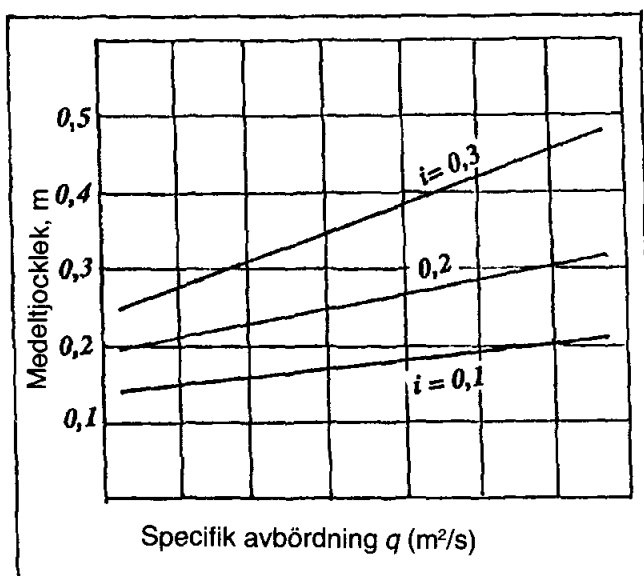
Ett erosionsskydd av den ovannämnda typen, speciellt framtaget för att skydda dammslänter vid överströmning utgörs av prefabricerade betongelement ordnade i stegform (figur 13) med eller utan sammankoppling. Omfattande modell- och prototypstudier genomförda i olika länder²⁾ pekar på låga kostnader per specifik avbördning (upp till 60 à 80 m³/s) i jämförelse med andra system [6], [7].

Deras effektivitet beror delvis på att den kinetiska energin omvandlas till dynamiskt tryck (10% omvandling) som pressar ner blocken och delvis av en hastighetssänkning genom en ökning av friktionsförlusterna (upp till 30% sänkning av vattenhastigheten, i jämförelse med en slät betongyta, för en specifik avbördning av 20 m³/s och en släntlutning av 14,5°, [6]. Upptrycksreduktionen orsakad av det dynamiska trycket leder till betydande minskning av elementens tjocklek (3 till 4 gånger mindre tjocklek än för kubformade betongelement med samma yta). Dessa egenskaper har gjort att de främst har använts till erosionsskydd för överströmmade dammslänter eller branta kanaler i anslutning till utskov.

²⁾USSR, Great Britain's Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), US Bureau of Reclamation (USBR), Federal Highway Administration (FHWA), USA.



Råhetsfaktorn f som funktion av förhållandet i/hc och utskovsskibordets lutning



Tjockleken hos de stegformade blocken som funktion av en specifik avbördning och utskovsskibordets lutning

Figur 13. Erosionsskydd med stegformade block.

A.4. Erosionsskydd av sammanhängande element

Stenfyllning förstärkt med förankrat stål nät

Stenfyllning förstärkt med förankrat stål nät kan vara ett alternativ för både vattenvägen och den eroderbara dammdelens kontur. De har tillämpas också som erosionsskydd vid överströmning av dammar [40], [41] eftersom de väl tål vattenhastigheter upp till 10 m/s.

Gabioner

En liknande metod är erosionsskydd med gabioner. De består av mindre enheter vilket gör att de inte tål så stora vattenhastigheter, (omkring 6 m/s, beroende på använd stenstorlek, möjligtvis ännu mindre för kraftigt turbulent strömning – se [9], [36], [42]. Samtidigt är deras små dimensioner en fördel eftersom de kan göras i ett större antal i ett verkstad och sedan transporteras till byggsplatsen. Skadade gabioner kan på så sätt lätt ersättas.

Madrasser

När stora ytor skall skyddas används ofta madrasser utförda av betongblock ihopkopplade med kablar och förankrade eftersom de är lätta att producera industriellt och kan utplaceras på kort tid. Vanligtvis brukar de placeras på kohesiv jordgrund med gräs planterat mellan blocken som ett extra stabiliseringsbidrag.

Beroende på detaljutformning och de förhållanden under vilka de testats (vattendjup och hastighet) kan de tåla mellan 6 och 8 m/s även som erosionsskydd för dammslänt som tillåts överströmmas [9], [36], [42], [43]. Enligt de systematiska studier som genomförts i olika länder är installationskostnaderna per enhet specifik avbördning för erosionsskydd i form av betongblock (lösa eller sammankopplade) betydligt lägre än för andra metoder som riprap eller betongplattor.

A.5. Gräs och geosyntetiska skydd

Gräs

Jordtytor planterade med gräs, även lutande, har en viss förmåga till motstånd mot erosion under begränsade tidsperioder. Studier bedrivna i England har visat erosionsmotstånd för branta slänter täckta med gräs vid hastigheter upp till 3,7 m/s under kortare perioder. Denna typ av skydd behöver underhåll och ständig bevakning.

Viktigt att understryka är att dess nederodering är en tidsberoende funktion till skillnad från de andra typer av erosionsskydd vilkas motståndsförmåga huvudsakligen är hastighetsberoende [43]. Dess användning begränsas därför till områden som överströmmas enbart under kortare perioder (några timmar), till exempel högsta delarna av vattenvägens slänter. Bättre resultat kan fås med geotextiler planterade med gräs vilka, korrekt utförda, kan tåla hastigheter från 3 upp till 5,5 m/s.

Geosyntetiska erosionsskydd

Geosyntetiska erosionsskydd [44] inbegriper syntetiska material som geotextiler eller geonät som används för att skydda ytor av jord mot erosion. Geotextilerna är material liknande textiler sammansatta av naturliga eller syntetiska fibrer. Geonät är relativt styva konstruktioner i plast som både skyddar mot erosion och bidrar till strukturens motståndskraft. De kan se ut som gabioner tillverkade i relativt styv plast.

Geotextiler

Geotextiler fungerar som filter och kan användas under andra typer erosionskydd eller utformas till enklare erosionskydd med ett system som håller dem på plats, ett skikt stenfyllning eller gräs. Detta skikt fyller samtidigt rollen som skydd mot UV-strålningen. För högre hastigheter kan förankringar också behövas. Deras användning och installation i terrängen måste ta hänsyn till deras sätt att förstöras [36]:

- genom hydrauliskt upptryck,
- genom höga hastigheter och med försumbart tidsberoende.

Geonät

Geonät rekommenderas som erosionskydd främst under den eroderbara dammdelen, mellan den och omgivande terräng samt mellan den och den övriga dammen.

A.6. Erosion under erosionskyddet**Permeabla erosionskydd**

Den hydrauliska gradienten hos det genomströmmande vattnet och följaktligen dess inre erosions- och transportförmåga bör sänkas genom användning av permeabla erosionskydd eller skydd med betongytor försedda med dräneringshål.

Behov av filterlager

Svårare att åtgärda blir de erosionsprocesser som pågår i ett erosionsbenäget material som befinner sig under ett mer erosionsbeständigt skikt. Möjligtvis bör dessa områden identifieras och undvikas eller det eroderbara materialet avlägsnas och ersättas. De flesta erosionskydden måste därför placeras på ett filterlager för att genomströmningen inte skall orsaka materialtransport från grunden.

Behov av förankringsåtgärder

Längs starkt lutande plan kan däremot filtret underlätta glidning av ovanliggande erosionskydd så att förankringsåtgärder kan behövas.

A.7. Miljöaspekter

I Sverige är miljömedvetenheten stor och tillhörande lagstiftning väl utvecklad men ännu hårdare krav kan komma att ställas i framtiden.

Om fuseplug eller annat typ av utskov väljs uppstår enbart en lokal inverkan i området närmast dammen.

Bevarandet av ett orört naturligt landskap anses av allmänheten så viktigt att nästan inga nya dammar får byggas i Sverige. Allt annat byggande som innebär ingrepp i vattendrag undergår strikt kontroll. Syftet är att bibehålla älvfårnas livsformer och utseende opåverkad. Fuseplugs bör därför analyseras också från denna synpunkt. I en jämförelse med traditionella utskov förekommer både för- och nackdelar.

Fördelar

Fuseplug av typen eroderbara dammdelar kan föredras från miljösynpunkt framför vanliga utskovsanordningar. Traditionella utskov brukar vara massiva konstruktioner i betong. Deras energiomvandlare och nedströmskanal är också ofta beklädda i betong. En fuseplug av typen eroderbar dammdel i stället för ett sådant utskov kan utgöra en mer miljövänlig lösning eftersom:

- nedströms om en fuseplug används i regel permeabla erosionsskydd som bevarar det ursprungliga vattenutbytet mellan ytan och grunden,
- en eroderbar dammdels utseende ”smälter” bättre in i landskapet än en massiv anordning i betong.

Naturliga material som stenar, gräs och trä utgör ett permeabelt skydd och samtidigt integreras de utseendemässigt bäst i landskapet. Gräs kan t ex utgöra ett erosionsskydd eller vara en del av andra skyddssystem och förbättra deras utseende och samverka med stödmaterialet.

Sammanfattningsvis bedöms alltid permeabla erosionsskydd i naturliga material vara att föredra från miljösynpunkt om de på ett tillfredsställande sätt fyller sin funktion.

Nackdelar

Ofta leder de mest fördelaktiga placeringarna av en fuseplug till att avbördningen sker i en annan dalgång. Att avbörda i andra dalar än dammens normala dalgång, samt att få acceptans för skador nedströms om dammen bedöms bli svårt ur ekologisk synpunkt. Ändå, för utskov av typ fuseplug som avses träda i funktion endast med mycket långa intervall, som t ex vid de dimensionerande flöde enligt Flödeskommitténs riktlinjer, kan detta möjligen vara lättare.

Utländska erfarenheter

De nämnda principerna för val av erosionsskydd och i allmänhet för val av byggnadsmaterial började uppmärksammas redan på 70-talet i t ex USA och Tyskland. I Tyskland har ett program påbörjats som avser att ersätta de befintliga typerna av skydd längs alla konstgjorda vattenvägar och över fyllningsdammar med mer miljömässiga alternativ. I USA har byggande av långa kanaler klädda i betong förbjudits för användning i vissa fall, medan i andra fall kanalbeklädnaden i betong har bytts ut mot miljövänliga alternativ.

Studier som jämför lämpligheten av att bygga fuseplug i stället för vanliga utskovsanordningar i betong vad gäller kompletterande utskov och reservutskov bör därför analysera problemet också från miljösynpunkt. Erfarenheterna i miljöproblematiken i samband med utbyggnad av vattendrag och lagstiftningar i andra länder som Tyskland och USA bör studeras.

B. GEOMEMBRANER

B.1. Allmänt

Geomembraner enligt dagens teknik är flexibla täta membraner gjorda av polymeriska material med en tjocklek av 0,5 upp till några millimeter [45].

De används främst som tätningsanordning eftersom deras permeabilitet genom membranens tjocklek ("permeability") är väldigt låg, runt 10^{-11} s^{-1} . Om materialet sträcks ökar permeabiliteten litet. Samtidigt kan även små skador leda till stora förändringar i permeabiliteten. Därför är det mycket viktigt att lägga geomembranerna på rätt underlag så att koncentration av spänningar samt punktering undviks. Detta underlag består av ett stödsikt av finare material som läggs under geomembranen samt ett skikt av grövre material. Stödsiktet fungerar både som spänningsfördelare och filter. Det grövre materialet utgör övergången till egenskaperna hos dammens fyllning. Ibland kan två parallella geomembraner användas med dränerande material utplacerat emellan. Detta system ger en ökad säkerhet.

Membranen brukar genomgå en lång rad tester rörande t ex permeabilitet, mekaniska egenskaper, känslighet för värme/kyla och känslighet för UV-strålning, kemiska och biologiska faktorer samt effekter av växtlighet. Sprödhetpunkt (omslagstemperatur till spröda egenskaper – "brittleness point") vid låga temperaturer testas också.

Vissa tester görs av fabrikanten andra, speciellt i dammbyggnadssammanhang, bör göras av användaren. Beskrivningar på vilka tester som behövs och hur de bör genomföras finns i litteraturen. En ganska noggrann beskrivning av geomembraner som tätningsanordning i fyllnadsdammar görs i ICOLD Bulletinen "Watertight geomembranes for dams" [45].

Geomembraner har hittills används som tätsikt vid 70 dammar. Deras funktion har provats vid dammar i vissa fall i 20 år med goda resultat. Dammen Contrata Sabetta, Italien, byggd år 1959, (32 m hög) är den första fyllnadsdamm som använde geomembran som tätsikt över uppströmssidan. De flesta används och rekommenderas för användning på lättillgängliga platser [45]. Vid dammar innebär detta att de läggs över uppströmsslänten. Denna placering underlättar besiktning och reparationsarbete. Några geomembran fungerar ändå som centralt placerad tätkärna men tekniken anses av ICOLD-kommittén inte tillräckligt spridd för att rekommenderas. Fyllningsdammar med centralt placerad geomembran som tätningsanordning är: Odielldammen i Spanien, 1974, 27 m hög och 94 m lång samt Valence d'Albi-dammen i Frankrike, 1989, 15 m hög och 44 m lång.

B.2. Material och klassificering

Geomembranerna klassificeras enligt deras material:

- syntetiska
 - plaster ("elastomer")
 - termiskt plastiska
- bituminösa
 - oxiderad asfalt
 - asfalt plaster

Här ges några exempel på material använda i Italien för geomembraner samt det högsta tryck de tål utan att läcka eller att få sprickor:

- butyl-kautschuk eller butengummi (50 MPa),
- polyetylen-bitumen (70 MPa),
- bitumen förstärkt med ovävd geotextil i polyester (10 MPa),
- gummi-bitumen förstärkt med polypropylene nät kallt utdragen ("cold autobending") (100 MPa).

Dessa material har olika känslighet för kyla. De tre första materialen tål t ex temperaturer mellan -30 och -40° C medan det sista ändrar sina egenskaper redan vid -2,5° C. Butengummi har hög känslighet för ozon och även små mängder av HCO₃ (hydrocarbonate).

De enstaka geomembrandukarna, vanligtvis tillverkade på industriell väg, sammanställs och tätas ihop genom olika procedurer beroende på membranens material:

- termisk svetsning (vulkanisering),
- kemiskt klistring (lösningsmedel, lösnings- och klistringsmedel, klistringsmedel, band).

Några typer av geomembraner kan tillverkas direkt på plats utan något sammansättningsbehov men däremot med mindre kontrollerbar kvalitet.

B.3. Tillämpning vid svenska eroderbara dammdelar

En eroderbar dammdel som har ett geomembran som tätsikt fungerar genom att stödmaterialet bakom tätkärnan spolats bort och membranen viks ner mot tröskeln. Följaktligen kan enbart syntetiska membran gjorda av elastomerer väljas ut som tätkärna i eroderbara dammdelar eftersom endast de är elastiska. Också vid låga temperaturer förblir de elastiska enligt testerna.

Eftersom eroderbara dammdelar är känsligare för materialtransport genom läckage kan två parallella geomembraner användas med dränerande material utplacerat emellan.

Om geomembran väljs som tätskikt i en svensk fyllnadsdamm eller eroderbar dammdel bör följande krav särskilt beaktas utöver de vanliga vid fyllnadsdammar:

- tålighet vid kyla (den bör förbli deformbar vid låga temperaturer),
- längs svetsningarna i fogar bör permeabiliteten vara lika låg som i övrigt,
- membranen bör tillhöra den typ som har geotextiler fastklistrade på membranens bägge sidor,
- om möjligt bör en typ av membran väljas som i verkligheten har visat sig behålla egenskaperna under längre tid (effekterna av åldringprocessen kända och försumbara),
- känslighet för UV-strålning, ozon och värme mindre viktiga (membranen kommer att vara täckta med fyllning),

För svenska dammar (eller eroderbara dammdelar) bör hög uppmärksamhet ägnas åt geomembranernas känslighet för kyla. Många typer av plast- eller gummimaterial ändrar sina egenskaper vid låga temperaturer. Främst förlorar de deformabiliteten, som är den

egenskap hos ett tätsikt av geomembran som gör att den kan användas vid en eroderbar dammdel.

Geomembranen bör tillhöra den typ som har geotextiler fastklitrade på membranens bägge sidor för att på så sätt få förbättrad friktionsfaktor mot fyllningen och sitta på plats under den tid den eroderbara dammdelen har dammfunktion. Dessa geotextiler har inte filterfunktion. Däremot kan andra geotextiler användas som filter runt geomembranen för att förbättra säkerheten mot läckage med materialtransport om sprickor i geomembranen befaras. Risken för läckage är ändå mindre än för en tät kärna i morän eller lera.

Känsligheten för UV-strålning innebär emellertid att exponeringen under byggnadstiden ska göras tillräckligt kort eller att geomembranen ska täckas snabbt efter utläggning.

B.4. Eroderbar dammdel vid Center Hill

En eroderbar dammdel byggdes för att komplettera avbördningskapaciteten hos Center Hill dammen i Caney Fork River, Tennessee, USA [12]. Den eroderbara dammdelens funktion studerades med hjälp av modellförsök. Försöket genomfördes i december 1992 vid det Hydrauliska och Geotekniska Laboratoriet, US Army Engineer Waterways Experiment Station (WES).

Längden hos den eroderbara dammdelen är 183 m och höjden 10,5 m. Den har en 1,7 m tjock tät kärna av lera lutande mot nedströmsdelen med 45°. En 15,2 m bred och 0,3 m djup ”pilot channel” kommer att initiera erosionen.

Vågskydd har föreslagits i form av stålspontar men inte införts på grund av för stora förluster i överfallshöjd vid överströmningen för erosionsinitiering. Flytande vågskydd uppskattades förorsaka mindre fallförluster och har testats i stället.

Erosionsinitiering med tatkärnan upp till krönet och 0,12 m fallhöjd över den eroderbara dammdelens krön misslyckades. En ny utformning med tatkärnans krön liggande 1,22 m under krönet och ett geomembran från tatkärnan till krönet erhållen efter flera försök fungerade bättre.

En annan utformning utan geomembran och med en lägre placerad tatkärna som möjliggjorde en 0,27 m överfallshöjd fungerade också bra. Tatkärnans övre del hade minskats med 33% av den ursprungliga tjockleken. Denna utformning rekommenderas och har testats i flera olika typer av försök.

En fyllning bestående av enbart sand har genom kapillaritets- och kohesionseffekt större erosions- och glidningsmotstånd än grövre material (grövre sand och grus). Därför har ett geomembran studerats som anordning för att underlätta erosionsinitieringen vid låg överfallshöjd när krönet överströmmas. Tillämpningen avser enbart en begränsad del (15,2 m lång) av den eroderbara dammdelen (”pilot channel”). Inga detaljer om den tekniska utformningen hos geomembranen har givits eftersom en annan utformning rekommenderades för prototypen.

B.5. Utskov skyddat med geomembran

Ett nödutskov typ utskov med fritt fall och kanal nedströms skyddades med geomembran täckt med okohesivt material. Denna typ av utskov utfördes 1988 som fältexperiment vid Cottonwood damm, Grand Junction i Colorado, USA [46].

De geomembraner som användes var 12,5 m breda och 1,5 till 21,4 m långa. De behövde därför överlappas för att täcka hela utskovet och kanalen. Överlappningarna var 1,5 m långa. I de prototypliknande försök som gjordes fungerade dessa överlappningar bra. Det undre partiet av överlappningen var helt torrt. Vatten hade runnit med 6 till 8 m/s med en vattenhöjd på 0,08 till 0,11 m.

C. VÅGSKYDD

C.1. Vågskyddsmetoder

Följande metoder kan tillämpas för att skydda en eroderbar dammdel mot vågor:

- välja skyddad plats för den eroderbara dammdelen,
- placera skikt av lösa stenar över uppströmsslänten,
- placera parapet på krönet,
- placera vågbrytare framför den eroderbara dammdelen,
- bygga upp strandliknande/plattformliknande fyllningar framför den eroderbara dammdelen,
- använda flytande däck, förankrade framför den eroderbara dammdelen som vågdämpning,
- förse initieringsanordningar av typ ”piping devices” med vågdämpare,

Om flera lämpliga lägen finns för den eroderbara dammdelen, bör det som är mest naturligt skyddat eller lättast kan skyddas mot vågor väljas.

Vågbrytare eller plattform som vågskydd rekommenderas främst i fördelaktiga lägen som när vattendjupet framför den eroderbara dammdelen är relativt litet (2–6 m) och särskilt för eroderbara dammdelar med tätkärna av lera.

Parapet framför den eroderbara dammdelen kan användas om det finns plats på tröskeln för den. Detta är fallet framför allt vid eroderbara dammdelar försedda med geomembran som har mindre fyllningsvolym.

C.2. Vågskyddsprincip

Fyllningen bakom tätkärnan hos en eroderbar dammdel är som regel lätt att erodera. Detta innebär att vågor som spolar över krönet bör undvikas på ett strängare sätt än för vanliga fyllningsdammar om onödiga aktiveringar av fuseplugen skall undvikas. Fast en oförutsedd fuseplug-utlösning inte bör innebära en fara för dammen eller dalen nedströms är en sådan utlösning av ekonomiska och psykologiska orsaker inte önskvärd. Därför bör skyddet emot vågor vid eroderbara dammdelar ges större uppmärksamhet än vid vanliga dammar. Beräkningar av dimensionerande våghöjder och utförandet av vågskyddet bör göras med större noggrannhet och säkerhetsmarginaler än för vanliga dammar. Effektivare metoder som skydd mot vågor bör studeras.

Vågberäkningar

Effekterna av eventuella reflekterade och diffrakterade vågor samt av stående vågor bör inräknas. På grund av den höga erosionskänsligheten hos eroderbara dammdelar, högre än vid vanliga fyllningsdammar, rekommenderas dimensionerande våghöjder högre än den specifika våghöjden (dvs våghöjder motsvarande vågor med längre återkomsttider, tex 1%) för vanliga fyllningsdammar om onödig aktivering av fuseplugen önskas undvikas.

Vindstyrka

Vindstyrkan tas i enlighet med Flödeskommitténs riktlinjer samt ”Tillägg nr 2 till Flödeskommitténs riktlinjer”.

Vågskyddet är avsett att skydda underliggande fyllning mot vågornas inverkan under den tid den eroderbara dammdelen fungerar som en del av dammen och samtidigt inte störa överströmningen då den eroderbara dammdelen träder i funktion. Både vågskyddet i form av lösa stenar och parapeten sammansatt av flera delar placerad på krönet bör kunna transporteras bort eller, om de förblir på plats, inte störa utskovsfunktionen. De typer av parapet som placeras på uppströmsslänten samt vågbrytare byggda framför den eroderbara dammdelen bör inte sänka överfallshöjden för mycket genom att orsaka för stora fallförluster.

Vid befintliga dammar kan enbart fuseplug som fungerar vid låga överfallshöjder tillämpas, eftersom vattenytan i magasinet inte får överstiga övre kanten hos dammens tätkärnan (jfr. avsnitten om aktivering) samtidigt som magasinets nivå efter det att fuseplugen har fungerat bör ligga så hög som möjligt. Detta leder till att relativt små vattenföringar per breddenhet rinner över den eroderbara dammdelen under den tid den fungerar som utskov. Dessa vattenföringar kan i de flesta fall inte transportera stenarna eller parapetens delar som har dimensionerats för att stå emot vågverkan. På detta sätt blir ofta stenarnas och parapetsdelarnas storlekar antingen för små för att stå emot vågorna eller för stora för att transporteras. Vågskyddet utgör därför ett kritiskt problem att lösa för den typen av eroderbar dammdel som kan vara aktuell vid svenska dammar. Två huvudlösningar erbjuds:

- att använda ett skikt större stenar över uppströmsslänten eller en parapet bestående av tunga element som kan stå emot vågorna och samtidigt ta hänsyn till att de förblir kvarliggande på tröskeln och påverkar utskovets kapacitet;
- att använda mindre stenar eller en parapet sammansatt av lätta element som kan transporteras och skydda den eroderbara dammdelen mot vågor med andra metoder (se nästa avsnitt). Dessa andra vågskyddsmetoder får inte leda till för stora fallförluster när den eroderbara dammdelen fungerar som utskov.

C.3. Lösa kvarliggande stenar

Genom erosion av underliggande stödmaterial kommer de större stenarna från uppströmsslänten att falla ner över tröskeln. Om dessa stenar ensamma utgör vågskyddet kan de i de flesta fall inte transporteras vid överströmning av tröskeln. I ett första skede kommer dessa stenar att lägga sig i en hög med finare material under. De kommer att ligga i ett lager med högst två skikt. Det finare materialet kommer att så småningom spolats bort och de större stenarna att lägga sig i ett skikt. Vid beräkningen av vattenföringen över den eroderbara dammdelen som fungerar som utskov bör hänsyn tas till detta fall när stenarna från vågskyddet lägger sig på tröskeln och minskar överfallshöjden.

Erosionsbenägenheten beror på stenarnas vikt, deras packning, gradering och sätt att lägga sig på tröskeln.

C.4. Parapet

Andra vågskydd än lösa stenar inbegriper alla typer av parapet, vågbrytare och plattform. Till skillnad från vågskydd av typ vågbrytare och plattform, som huvudsakligen minskar våghöjden, stöter en vanlig parapet bort vågorna, så att enbart sällan relativt små, oskadliga

vattenmängder spolas över dess krön. Samtidigt bör man vara medveten att den också spelar rollen av vågbrytare. Detta innebär att den kommer att vara utsatt för dynamiskt tryck men är inte avsedd att skydda mot en varaktigt högre vattenyta. Därför brukar de flesta parapeter förses med hål (så kallade "weep-holes", se figur 10, sidan 21) som minskar det dynamiska trycket eller så kan de bestå av lösa lätta element som t ex i figur 14 i denna bilaga eller sponter placerade med spalter mellan sig.

Parapeten kan sättas på den eroderbara dammdelens krön, på uppströmsslänten eller framför dess fyllning. I de två sista fallen bör den ha perforerade hål eller spalter mellan elementen för att samma lugnvattennivå (utan vågor) skall fås bakom parapeten som i reservoaren.

Parapet som vågskydd bör utföras så att den inte förhindrar den eroderbara dammdelens erosion och bortspolning efter aktivering. Vid avsedd vattennivå i magasinet bör den relativt lätt välta omkull, falla i delar och transporteras med underliggande fyllning. Dess vikt och form skall vara sådan att den kan transporteras med vattnet. Det kan också accepteras att parapeten eller delar av den blir kvar på tröskeln under förutsättning att detta inte hindrar den avsedda erosionprocessen och inte heller utskovsfunktionen. Följaktligen bör parapeten inte bestå av för tunga eller av fastbundna element. Långa murar i armerad betong ska helst undvikas, liksom skydd som är förankrat i partier som inte är avsedda att erodera. Parapeten kan däremot byggas av lösa delar, gärna prefabricerade med mindre hållbara sammankopplingar emellan. Deras fäste i grunden bör vara minimalt eller lätt att underminera/erodera vid aktivering. Under materialbortspolningen bör elementen inte fånga in stenar och på så sätt minska överfallshöjden över utskovet. Elementen får ha spalter mellan sig (figur 14) om de sitter framför den eroderbara dammdelen och inte ersätter en del av dammen.

Nackdelen med ett sådant vågskydd är att det består av varandra oberoende element placerade på granulärt material under vågornas verkan. Under dessa förutsättningar kan i det underliggande friktionsmaterialet (särskilt om det gäller sand) förekomma flytjordsbildning ("liquefaction") på grund av elementens periodiska rörelse som orsakas av vågor. För att undvika eventuell underminering i förtid genom pumpningsfenomen och bildning av flytjord i grunden får parapeter bestående av lösa delar inte placeras på sandgrund. Mer sofistikerade sammankopplingar eller förankringssystem kan skapas för att undvika detta problem.

Fördelen med en parapet med raster är att den kan skydda mot vågorna och ändå inte förhindrar vattenströmningen när den eroderbara dammdelen skall erodera. De kraftigt förhöjda energiförlusterna vid genomströmning genom rastera bör dock tas med i beräkningarna. Sponterna med spalter mellan sig kan med fördel placeras i plan i schackmönster för att något minska dessa förluster, se figur 15 i denna bilaga.

Vågskydd i form av parapet rekommenderas främst för eroderbara dammdelar med tät kärnan av geomembran. Denna typ av eroderbar dammdel med sin mindre beprövade tätningsanordning och med mindre fyllningsvolym tycks vara ännu känsligare för enstaka vågöverspolningar. Eroderbara dammdelar med tät kärnan av geomembran erbjuder vanligtvis större yta för vågskyddets placering framför fyllningen eftersom själva fyllningen är mindre och kräver mindre yta. I de fall parapeten sätts på krönet kan den också bidra till att minska fyllningsvolymen och underlätta den önskade erosionen.

C.5. Plattform

Vågbrytarens och plattformens funktion är att minska våghöjden till en vågstorlek som inte kan transportera stenarna från den eroderbara dammdelen. Den största sten som kan placeras i den eroderbara dammdelen i ett sådant fall är den sten som kan transporteras vid den överfallshöjd som gäller när den eroderbara dammdelen fungerar som utskov.

Plattformen kan ganska lätt byggas om vattnet är tillräckligt grunt framför den eroderbara dammdelen. Beroende på nödvändig längd parallellt med den eroderbara dammdelen beräknas fyllningsvolymerna. Fyllningsvolymerna och kostnaderna för utförande bestämmer om denna lösning blir intressant från ekonomiskt synpunkt. Nackdelen med en plattform framför den eroderbara dammdelen är att den kommer att minska den specifika avbördningen per breddenhet under den tiden den eroderbara dammdelen fungerar som utskov. Plattformen kan också innebära reducerad avbördningskapacitet på grund av drivgods.

C.6. Vågbrytare

Med tanke på nackdelarna en plattform medför anses en vågbrytare bättre. I fortsättningen rekommenderas två typer mindre vanliga vågbrytare på grund av deras effektivitet till jämförelsevis lägre kostnader och enkla byggmetoder:

- vågbrytare med plattform ("berm"),
- cylinderformad geotextil fylld med bruk.

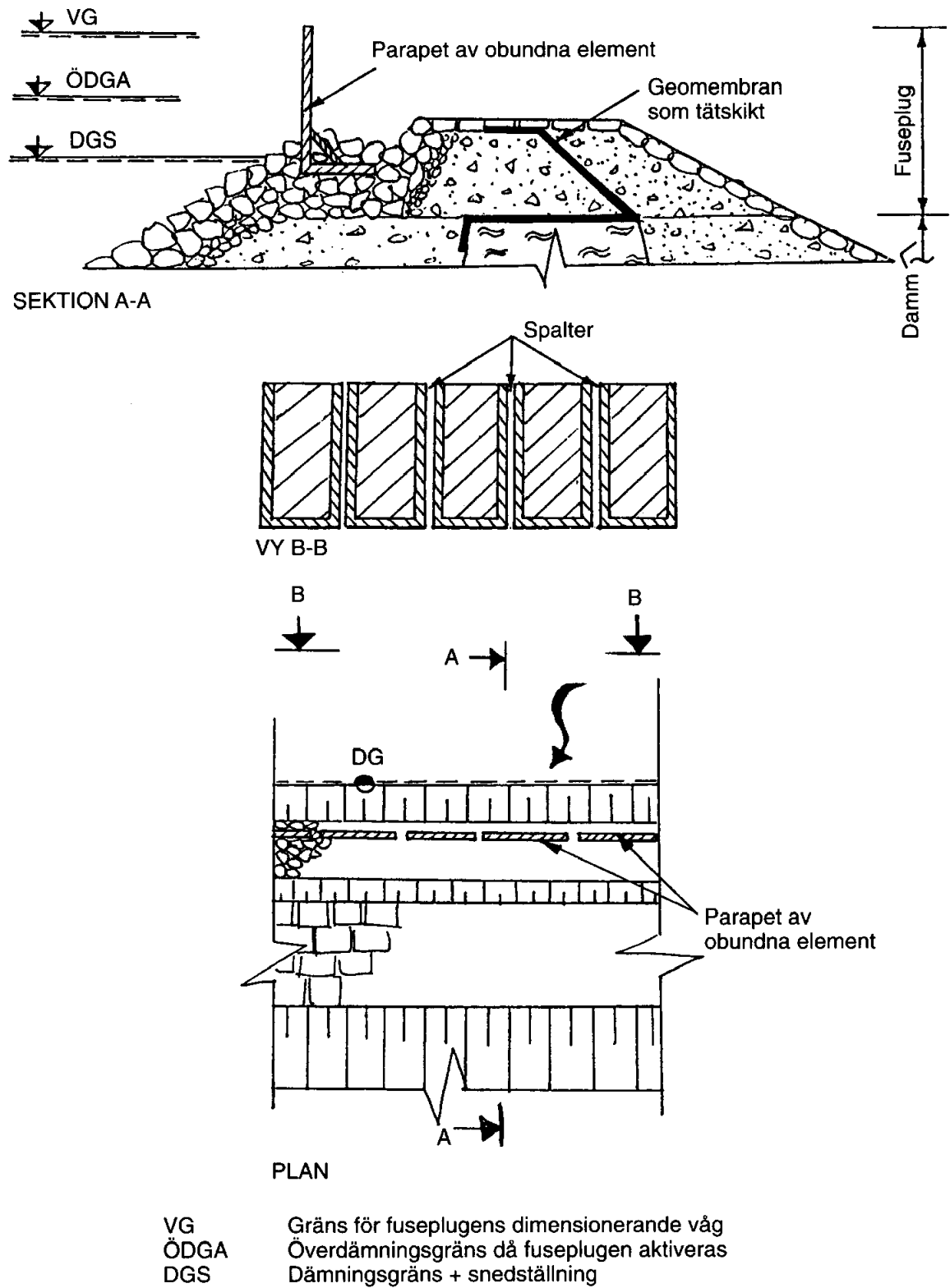
Om vågbrytare placeras med krönet ungefär 1,2 gånger den dimensionerande våghöjden under vattenytan bryts vågorna över den. Detta innebär att vågornas höjd begränsas till 0,8 à 0,9 gånger vattendjupet över vågbrytarens krön.

Vågbrytare med plattform

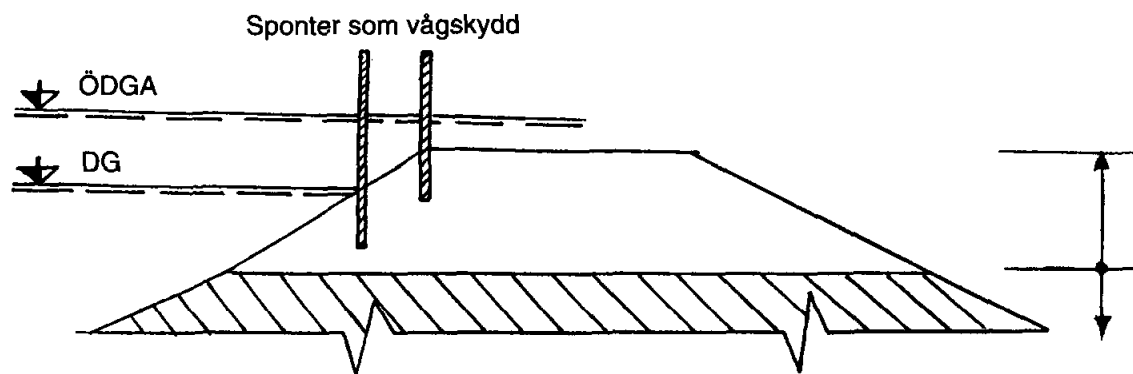
En vågbrytare med plattform har fördelen att vara uppbyggd av stenfyllning med ganska liten korndiameter (ungefär 5 gånger mindre än den som behövs för vanliga typer av vågbrytare). Den motstår vågorna genom sin dynamiska profil som följer den naturliga jämnviktprofilen som en viss typ av våg och en vis stormtidslängd skulle ha skapat. För till exempel en storm som producerar vågor med en specifik höjd av 1 m (de dimensionerande vågorna för fribordet) under ungefär 2,6 timmar kan en vågbrytare med plattform se ut som i figur 16 och 17 i denna bilaga. Beräkningarna gjordes enligt [50].

Vågbrytare av geotextiler fyllda med bruk

En vågbrytare kan byggas med hjälp av element som i figur 16 i denna bilaga samt tabell 1 (från [50]). De cylinderformade geotextilerna sätts fast på botten eller ovanpå andra redan stelnade element och fylls på plats med bruk. Den enda utrustningen som används är en betongpump. Ingen kran behövs således. Denna typ konstruktion behöver ingen bearbetning av grunden och kan sättas på vilken typ av material som helst inklusive lösa eller organiska sediment. Ibland kan själva utförandet ske i torrhet under de perioder vattenytan i magasinet ligger tillräckligt under dämningssgränsen.

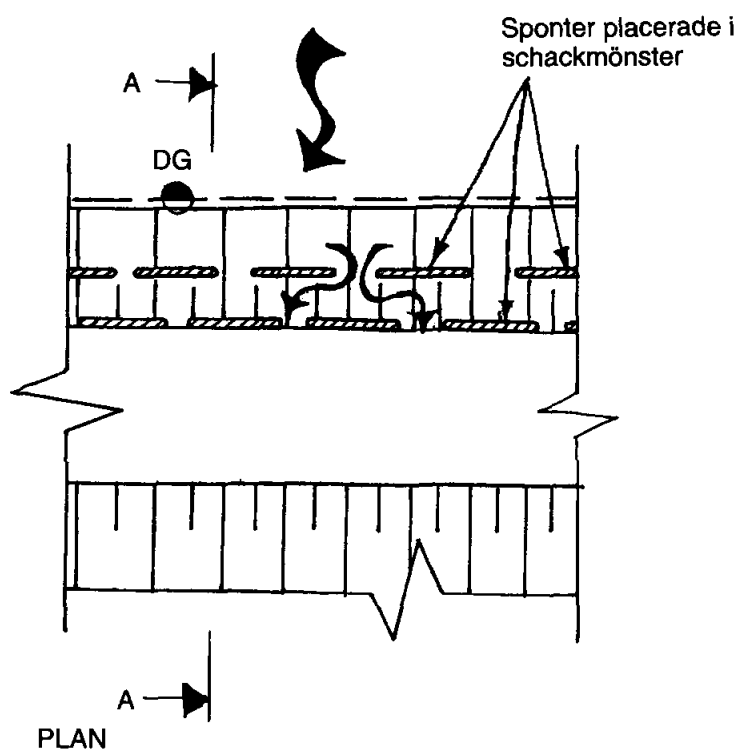


Figur 14. Vågskydd. Parapet av obundna element.

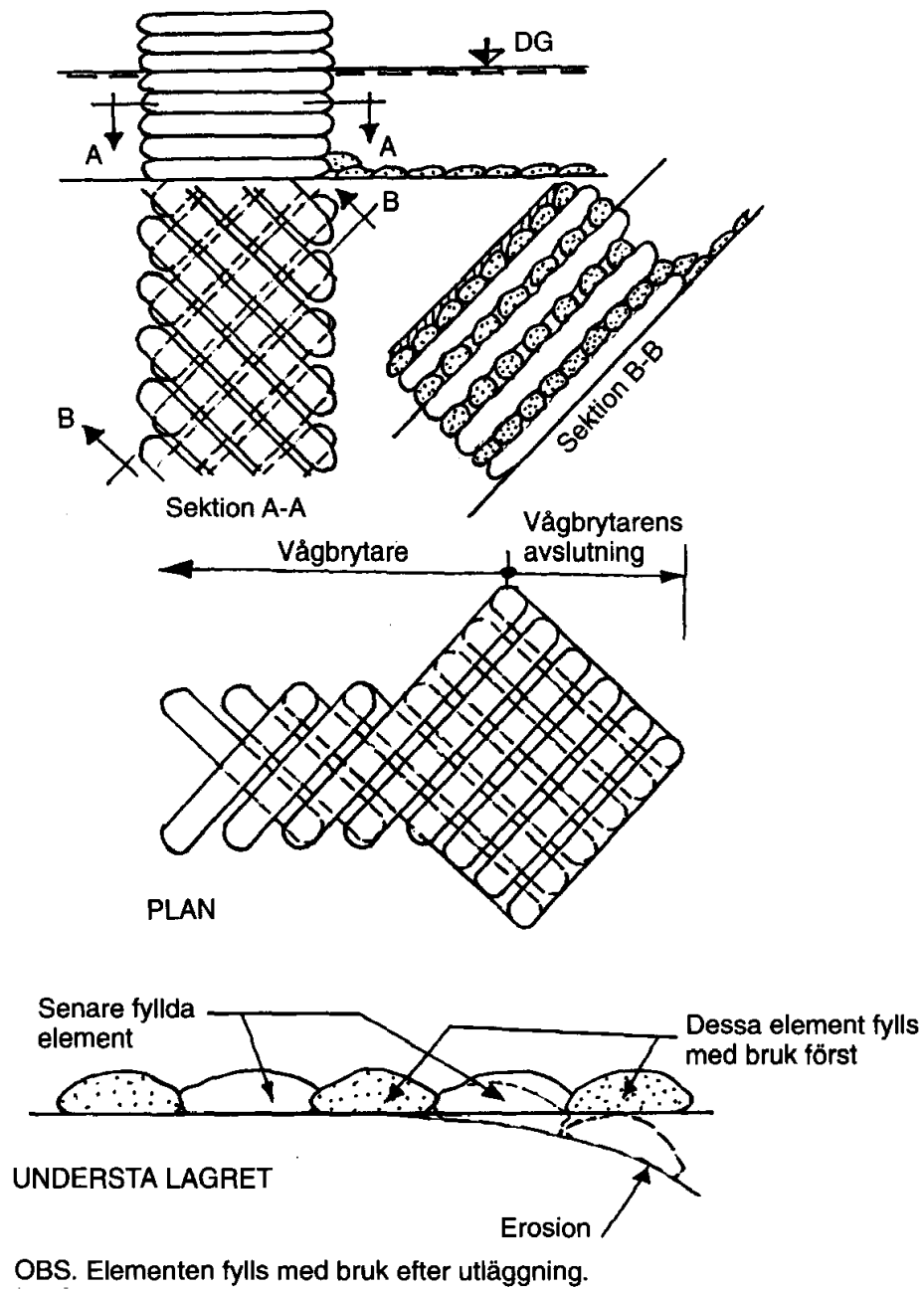


SEKTION A-A

ÖDGA = Överdämningsgräns då fuseplugen aktiveras



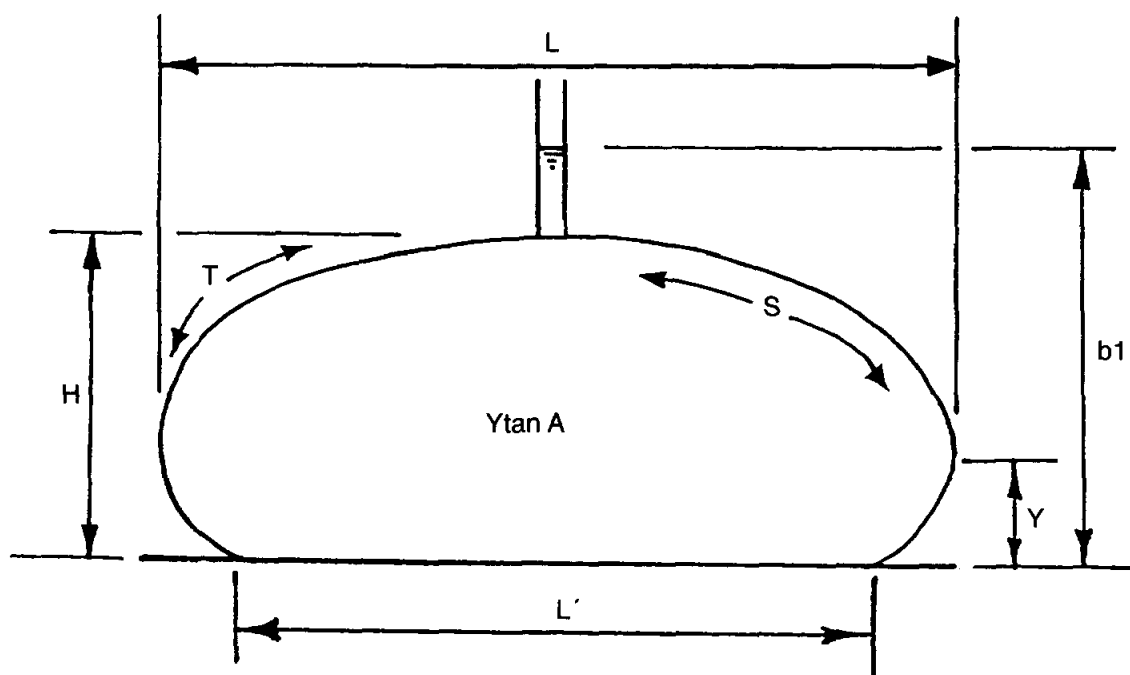
Figur 15. Sponter placerade i schackmönster som vågbrytare.



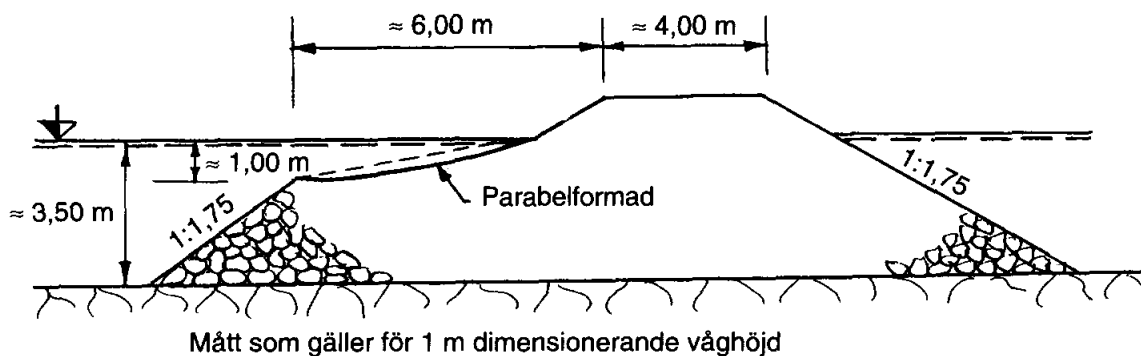
Figur 16. Skydd mot vågor. Cylinderformade byggelement av geotextiler fyllda med bruk.

H [m]	H/S	b1/S	b1 [m]	L/S	L	L'	A/HL	A	2T/γS	T [kg/m]	T' [kg/m]
1,0	0,273	0,62	2,27	0,348	1,27	0,46	0,825	1,05	0,130	1,202	2,096
0,9	0,250	0,42	1,54	0,361	1,32	0,62	0,832	0,99	0,075	1,693	1,209
0,8	0,218	0,31	1,13	0,380	1,39	0,82	0,851	0,95	0,043	1,397	1,692
0,7	0,191	0,25	0,92	0,395	1,45	0,94	0,875	0,89	0,031	1,286	1,499
0,6	0,164	0,19	0,70	0,410	1,50	1,05	0,905	0,81	0,021	1,194	0,338
0,5	0,137	0,16	0,59	0,425	1,55	1,21	0,950	0,74	0,015	1,139	1,242

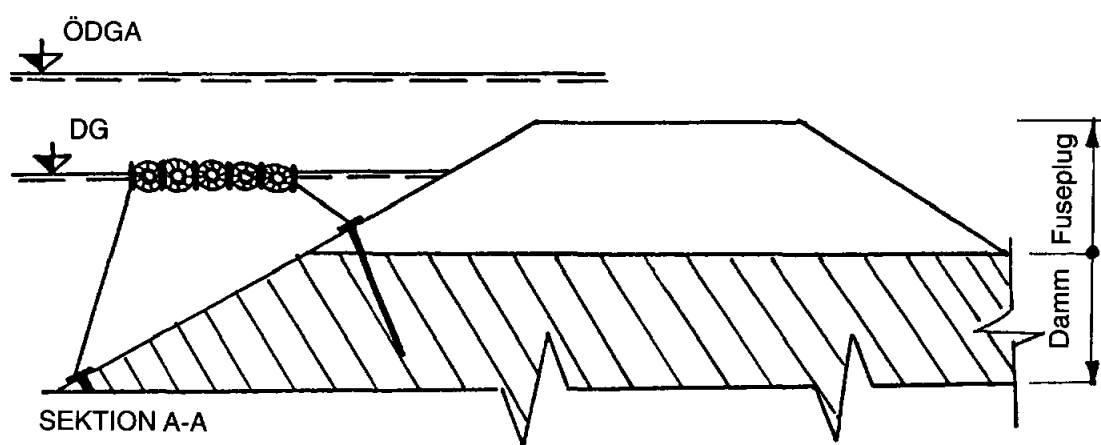
Tabell 1. Variabler som används vid projektering av cylinderformade byggelement tillverkade av geotextiler fyllda med bruk med en diameter av 3,66 m.



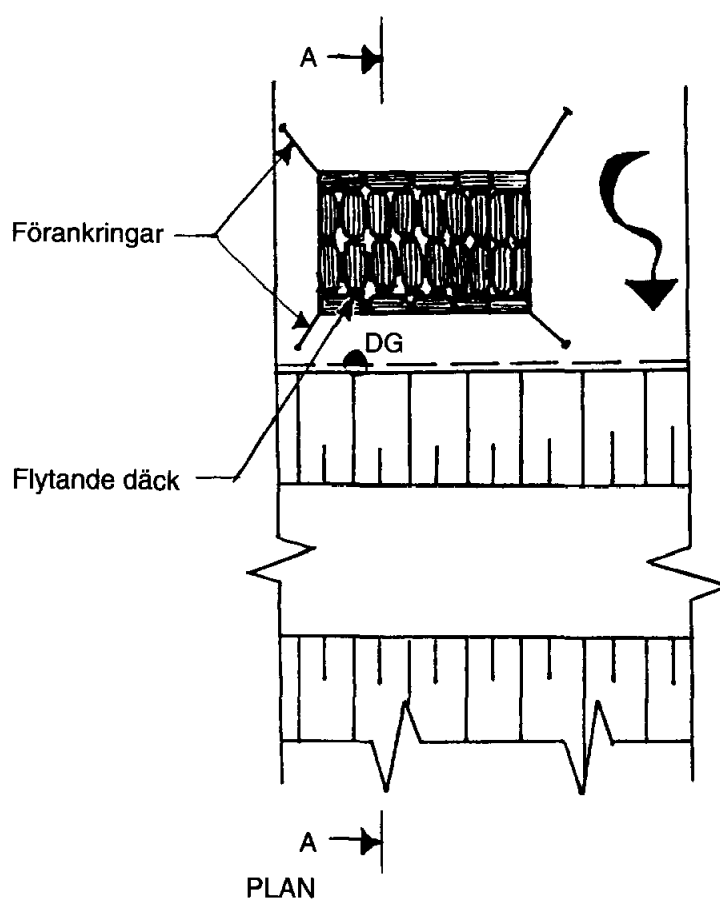
Figur 17. Skydd mot vågor. Cylinderformat byggelement av geotextil fyllt med bruk. Tvärsektion.



Figur 18. Vågskydd. Vågbrytare med plattform.



ÖDGA = Överdämpningsgräns då fuseplugen aktiveras



Figur 19. Flytande däck för vågdämpning.

Denna typ av vågbrytare har också en mindre tvärsektion, dvs mindre material och följaktligen krävs mindre kostnader än för vågbrytare med full sektion. Dess porositet ligger på $n=0,5$. Detta gör att vatten kan strömma genom vågbrytaren så att trycket på konstruktionen är lägre och strömningen mot utskovet störs i mindre utsträckning. Vid fallförlustberäkningarna som behövs för att fastställa överfallshöjden och följaktigen vattenföringen över tröskeln måste hänsyn tas till att vattnet strömmar över och genom denna vågbrytare samt att de största vattenmängderna strömmar parallellt med den eroderbara dammdelens krön.

C.7. Flytande vågdämpare

Flytande däck för vågdämpning ("floating tire wave suppressors") kan rekommenderas särskilt om läget inte är lämpligt för vågbrytare eller plattform och det inte heller finns tillräcklig med plats för vågskydd av typ parapet. De flytande däcken förankras i den eroderbara dammdelens uppströmsslänt (figur 19 i denna bilaga).

De är mindre effektiva och deras verkan mindre kontrollerbar och bör därför hellre kombineras med andra typ vågskydd. Deras fördel är att de orsakar mindre energiförluster än sponter med raster vid överströmning av den eroderbara dammdelen. De kan rekommenderas, i kombination med andra typ av vågskydd, framför t ex den eroderbara dammdelens "pilot channel" som för Center Hill fuseplug utskov [12].

C.8. Vågskydd för initieringsanordningar

I en "pilot channel" eller nedsänkt kanal som vid Chocon dammen (figur 10) är krönet lägre än resten av dammen. På detta sätt underlättas överspolningen av vågor över krönet ytterligare inom dessa partier. Initieringsanordningar av typ "piping devices" som leder vattnet genom rör till de erosionskänsliga partierna nedströms om tåtkärnan (figur 9) kan börja träda i funktion på grund av vågor före avsedd tidpunkt för aktivering. Därför bör ännu högre krav ställas på vågskyddet för dessa anordningar. Speciella konstruktioner för lokal utjämning av vattenytans variationer brukar användas för att skydda dessa initieringsanordningar.

Anordningar för vågdämpning eller utjämning av vattennivån ("water level control shaft") används för anordningar som leder vattnet över tåtkärnan till de partier som är avsedda att eroderas först. De brukar bestå av en vattenbehållare i kontakt med vattnet i magasinet genom ett rör eller ett hål placerat med snedställning över dämningssgränsen. Denna behållare är byggd som en betongkassun för "piping devices" vid Mosuldammen och som en nedsänkt kanal bakom parapeten och parallellt med krönet vid Chocondammen. Från samma behållare leds vattnet över tåtkärnan till de erosionskänsliga partierna genom ett rör eller kanal placerad på den nivå vid vilken vattenyta är tänkt att aktivera den eroderbara dammdelen.

Denna typ av anordning dämpar överföringen av vattenytans variationer från vågor till vattenvolymen i behållaren. Vattenytans nivå i behållare blir därför magasinet nivå utan vågor påverkan. För aktivering genom inre erosion ser sådana anordningar ut som i figur 9. För aktivering genom överströmning som i figur 10 kan det nedsänkta partiet bakom en skyddsmur utrustad med hål spela rollen av utjämnare av vattenytans variationer.

D. SNEDSTÄLLNING

D.1. Definition

Under huvudsakligen vindens dragkraft undgår vattenvolymen i magasinet en denivellering som kan höja vattenståndet lokalt. Detta fenomen kallas för snedställning. Vanligtvis brukar denna upphöjning vara begränsad till ett par decimeter eller centimeter beroende på storleken hos magasinets yta samt vindstyrkan.

D.2. Fribord och snedställning

Fribordet hos dammar (avståndet mellan dämningssgränsen och dammkrönet) är avsett för att undvika att vågor spolar över dammkrönet. Fribordet har en viktig funktion, särskilt vid fyllningsdamm. Fribordet hos dessa dammar beräknas genom att man summerar vattenytans alla möjliga upphöjningar respektive uppspolningshöjden och snedställningen. Det är också brukligt att addera ett viss avstånd (t ex 1 m) som säkerhetsmarginal.

Den varaktiga vattenytan överförs genom fyllningen över hela dammsektionen. Om vattenytan når och överströmmar tåtkärnans krön kan detta innebära fara för dammen (inre erosion av materialet över tåtkärnans krön). Därför bör ett fribord mellan dämningssgränsen och tåtkärnans övre kant lämnas motsvarande den vattenyta i reservoaren som varar tillräckligt lång tid för att överföras till tåtkärnan. Tåtkärnans fribord blir därför, till skillnad från fribordet till dammkrönet, lika med snedställningen plus möjligtvis något säkerhetsavstånd. Genom att den innebär en varaktigare upphöjning av vattenytan i jämförelse med vågorna blir snedställningen bestämmande för storleken för tåtkärnans fribord.

Under tiden den eroderbara dammdelen aktiveras och fungerar som utskov är det nödvändigt att vattenytan i reservoaren ligger på en högre nivå än normalt (över dämningssgränsen). Denna högre vattenyta bör inte leda till att tåtkärnan i dammen överströmmas och inte heller dammkrönet. För att kunna avgöra hur stor nivåhöjning som kan användas för att aktivera den eroderbara dammdelen med minsta möjliga ingrepp i den befintliga dammen och utan att sänka dammens säkerhet bör både fribordet mot dammkrönet och tåtkärnan räknas om med större noggrannhet och följaktligen bör också snedställningens beräkning vara tillförlitlig.

Snedställningen beror i hög grad på vattendjupet längs hela sträckan framför dammen. Samtidigt är det, för spärrdamm som är nära dammen, möjligt att samma snedställning, respektive den högsta, överförs till båda. Således bör för sådana anläggningar snedställningen beräknas i en första approximation för både dammen och spärrdammen och det högsta värdet väljas.

D.3. Beräkningsmetoder

Empiriska koefficienter

Svårigheter kan förekomma på grund av att formlerna för beräkning av snedställningen innehåller empiriska koefficienter dvs koefficienter uppmätta för en viss sjö och storm. Dessa koefficienter är inte konstanter utan beror på olika egenskaper hos den sjö och storm de har blivit uppmätta för. Formler utvecklade med utgångspunkt i naturliga förhållande

som är närmast det aktuella fallet bör väljas. Tex ger Zuidersee-formeln som rekommenderas i de norska normerna för dammar andra värden än formeln från "Shore protection manual" (US Army Coastal Engineering Research Center) rekommenderad av SMHI. Med hänsyn till vikten av att inte överspola en fuseplug i onödan bör man tills man har utrett vilken som är bäst anpassad till svenska förhållanden välja den andra formeln eftersom den ger större värde för snedställningen.

Reservoarens längd och form

Det kan påpekas att Zuidersee är en havsvik på Hollandskust. Den har en betydligt större längd än vanliga reservoarer vid (svenska) dammar. Detta ger annorlunda koefficienter för energiöverföring från vind till vattenytan. Många av de formler som rekommenderas i USAs eller Kanadas normer har som utgångspunkt de stora sjöarna i norra USA eller konstgjorda reservoarer mycket större än de svenska. Formlerna är också utvecklade med utgångspunkt i regelbundna former hos magasinet. Detta är nästan aldrig fallet i Sverige, särskilt vid reservoarer i fjällområden. Numeriska beräkningar kan bara delvis undanröja detta.

Vindskalor

Äldre formler använder koefficienter med utgångspunkt i vindskalor, som är svårt att korrekt överföra till nu gällande sådana. Detta gör att dessa formler enbart ytligt kan jämföras med nya mätningar och beräkningsrutiner för att värderas. Detta gäller till exempel Hellströms formel.

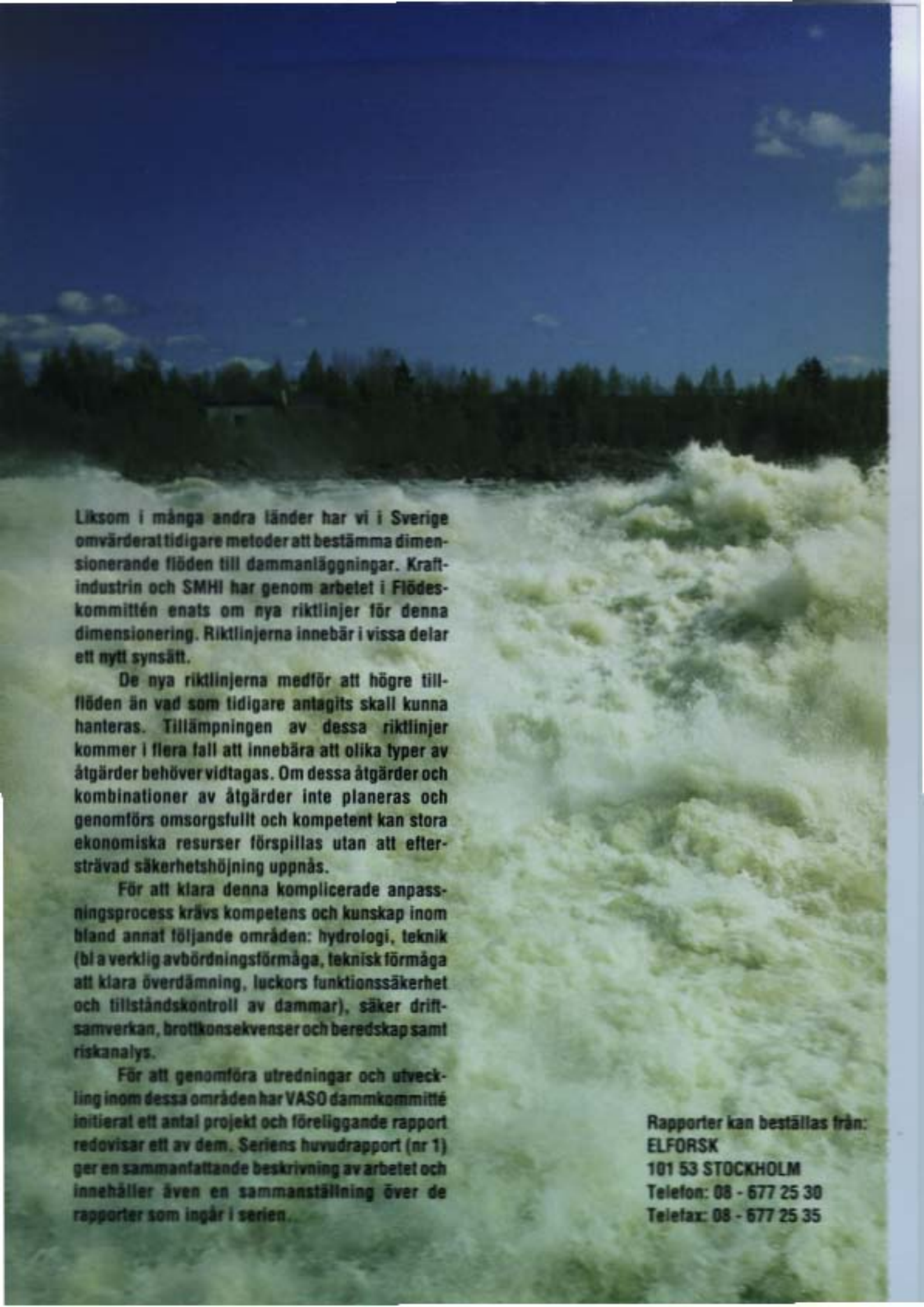
För studium av hur dessa formler ser ut samt andra aspekter angående snedställning och vågberäkningar rekommenderas rapport nr 10 om vågor vid kraftmagasin i denna serie [49].

ANTECKNINGAR

ANTECKNINGAR

ANTECKNINGAR

ANTECKNINGAR



Liksom i många andra länder har vi i Sverige omvärderat tidigare metoder att bestämma dimensionerande flöden till dammanläggningar. Kraftindustrin och SMHI har genom arbetet i Flödeskommittén enats om nya riktlinjer för denna dimensionering. Riktlinjerna innebär i vissa delar ett nytt synsätt.

De nya riktlinjerna medför att högre tillflöden än vad som tidigare antagits skall kunna hanteras. Tillämpningen av dessa riktlinjer kommer i flera fall att innebära att olika typer av åtgärder behöver vidtagas. Om dessa åtgärder och kombinationer av åtgärder inte planeras och genomförs omsorgsfullt och kompetent kan stora ekonomiska resurser förspillas utan att eftersträvd säkerhetshöjning uppnås.

För att klara denna komplicerade anpassningsprocess krävs kompetens och kunskap inom bland annat följande områden: hydrologi, teknik (bl a verklig avbördningsförmåga, teknisk förmåga att klara överdämning, luckors funktionssäkerhet och tillståndskontroll av dammar), säker driftsamverkan, brottkonsekvenser och beredskap samt riskanalys.

För att genomföra utredningar och utveckling inom dessa områden har VASO dammkommitté initierat ett antal projekt och föreliggande rapport redovisar ett av dem. Seriens huvudrapport (nr 1) ger en sammanfattande beskrivning av arbetet och innehåller även en sammanställning över de rapporter som ingår i serien.

Rapporter kan beställas från:
ELFORSK
101 53 STOCKHOLM
Telefon: 08 - 677 25 30
Telefax: 08 - 677 25 35